



Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse des températures réparties, mesurées par fibre optique

Pierre Cunat

► To cite this version:

Pierre Cunat. Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse des températures réparties, mesurées par fibre optique. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENI007 . tel-00721827

HAL Id: tel-00721827

<https://theses.hal.science/tel-00721827>

Submitted on 30 Jul 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Matériaux – Mécanique – Génie-civil –
Électrochimie**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Pierre CUNAT

Thèse dirigée par **Yves-Henri FAURE**
co-dirigée par **Yves-Laurent BECK**

préparée au sein du **Laboratoire d'étude des Transferts en
Hydrologie et en Environnement**
dans l'**École Doctorale Ingénierie Matériaux Mécanique
Énergétique Environnement Procédés Production (I-MEP²)**

Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse de températures réparties, mesurées par fibre optique

Thèse soutenue publiquement le **08/03/2012**,
devant le jury composé de :

Monsieur Philippe COTE

Directeur de Recherche à IFSTTAR-Nantes (Rapporteur)

Monsieur Alain TABBAGH

Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie (Rapporteur)

Monsieur Yves-Laurent BECK

Chargé d'Affaires à EDF-DTG (Membre)

Monsieur Yves-Henri FAURE

Maître de Conférences à l'Université Joseph Fourier (Membre)

Monsieur Yann MALECOT

Professeur à l'Université Joseph Fourier (Membre)

Monsieur Jérôme MARS

Professeur à Grenoble INP (Membre)

Monsieur Paul ROYET

Ingénieur de recherche au CEMAGREF d'Aix en Provence (Membre)



Thèse de doctorat / PhD thesis - Université de Grenoble / Grenoble university

Auteur : Pierre CUNAT

Établissement : LTHE -BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

Titre : Détection et évaluation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par analyse de températures réparties, mesurées par fibres optiques

Résumé

Les fuites au travers des ouvrages hydrauliques en remblai sont les signes précurseurs d'un dysfonctionnement du dispositif d'étanchéité de l'ouvrage pouvant entraîner leur rupture. La détection précoce des fuites et leur quantification est donc primordiale.

Les méthodes géophysiques et thermométriques à grand rendement apportent des éléments de réponse pour la détection des fuites, le long des ouvrages à long linéaire, mais l'estimation de leur vitesse, nécessaire à l'évaluation de la dangerosité des fuites, n'est pas encore satisfaisante.

Cette étude porte sur la détection et quantification des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai soumis à une charge d'eau permanente. Les méthodes proposées exploitent des mesures de températures naturelles du sol à l'aide de fibres optiques placées sous le talus amont ou aval.

Deux modèles de quantification ont été développés et testés sur les données d'un site expérimental contrôlé et d'un site réel. Les résultats obtenus concordent avec les mesures de vitesse effectuées sur les deux sites.

Mots clés : ouvrages hydrauliques, digues, fuites, température, fibre optique, quantification, vitesse de fuite

Title : Detection and evaluation of leakages through embankment dams, by analyse of distributed temperature, measured using optical fibers

Abstract

Leakages through embankment dams are early warning signs of a sealing malfunction and could lead to its breakdown. Early detection of leakages and their quantification is essential.

High output geophysical and thermometric methods provide some answers for leakage detection along long linear embankment dams, but their velocity estimations necessary to assess the danger of leakages, is not yet satisfactory.

This study focuses on the detection and the quantification of leakages through embankment dams under hydraulic head. The proposed method use natural temperature measurements from the ground using optical fiber buried under the upstream or downstream face.

Two models of quantification were developed and tested on data from an experimental site and a real site. Results are consistent with velocity measurements made at both side.

Keywords : embankment dams, dikes, leakages, temperature, optical fiber, quantification, leakage velocity

Remerciements

Dans un premier temps, j'adresse mes remerciements à mes encadrants, Yves-Henri Faure, mon directeur de thèse et Yves-Laurent Beck, co-encadrant, qui durant ces trois années m'ont soutenu et orienté dans l'élaboration de ce travail de thèse.

Ensuite, je tiens à remercier, Philippe Cote et Alain Tabbagh, rapporteurs de ce mémoire de doctorat. Je remercie Jérôme Mars qui a bien voulu présider mon jury de thèse. Mes remerciements s'adressent également aux autres membres de mon jury, Yann Malécot et Paul Royet, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour leur participation à ma soutenance de thèse.

Je remercie mes collègues chercheurs et thésards du LTHE pour leurs avis scientifiques pertinents et leurs idées qui m'ont ouvert de nouvelles pistes de réflexion.

Je remercie mes collègues de EDF-DTG pour leur implication dans mon travail de thèse, merci à Muriel pour son aide dans mes essais expérimentaux, et pour tous les moments partagés lors de nos déplacements, merci à Alexandre et Jérôme pour leurs conseils très avisés et pour leur soutien, merci à mes collègues du domaine eau pour leur appui technique et leur expertise en matière de mesures, enfin merci à Alexia, Thomas et Pierre, stagiaires à EDF-DTG, pour leur contribution.

J'exprime toute ma gratitude à mes collègues d'EDF-R&D de Chatou et en particulier à Guy Durso, Alexandre Girard et Steven Kerzélé, pour leur très riche contribution scientifique sur les aspects modélisations de mon travail. Leur expertise a indéniablement guidé l'élaboration de mon travail de thèse. Je tiens aussi à remercier mon ami Tuan et sa femme Tao pour ces délicieuses soirées passées en leur compagnie lors de mes déplacements sur Chatou.

Les résultats de ce travail sont basés sur un ensemble d'expérimentations qui se sont principalement basées sur le site du CEMAGREF à Aix en Provence et sur le site de l'usine hydroélectrique EDF de Kembs. Je remercie le Cemagref, pour la mise à disposition du bassin PEERINE et pour son implication dans mon programme expérimentale. J'adresse tout particulièrement mes remerciements à Paul Royet et Guillaume Nunès qui, l'un comme l'autre ont joué un rôle déterminant dans l'obtention de ces données expérimentales. Je remercie mes collègues d'EDF de l'usine de Kembs pour la mise à disposition de leur ouvrage et pour leur appui technique.

J'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant ces trois années de doctorat. Je remercie en particulier Amélie pour son aide précieuse.

Enfin, dans ces remerciements, je n'oublie pas ma famille, mes sœurs et mes parents, pour leur contribution, leur soutien infaillible et leur patience.

Merci à toutes et à tous.

Table des matières

Résumé	3
Remerciements	5
Table des matières	7
Introduction	14
1 L'importance de la surveillance des fuites pour les ouvrages en remblai	19
1.1 Définition des ouvrages en remblai	20
1.2 Les mécanismes de rupture des ouvrages en remblai	20
1.2.1 L'érosion externe	21
1.2.2 L'érosion interne	22
1.2.3 Le glissement de talus	25
1.3 Description des fuites dans les ouvrages en remblai	26
1.3.1 Description d'une fuite	26
1.3.2 Conséquences des fuites :	28
1.3.3 La surveillance des fuites	28
2 Méthodes de détection des fuites	31
2.1 Les méthodes géophysiques	32
2.1.1 La méthode de résistivité électrique	32
2.1.2 Méthodes électromagnétiques basse fréquence (EM-BF)	34
2.1.3 Méthode de potentiel spontané (PS)	34
2.2 Méthodes thermométriques pour la détection et la quantification des fuites .	35
2.2.1 Principe de détection des fuites par méthodes thermométriques	35
2.2.2 Dispositifs de mesures de température	36
2.2.3 Méthodes de détection et quantification existantes	42
3 Description des transferts d'eau et de chaleur dans une digue	59
3.1 Écoulements dans un milieu poreux, le sol	60
3.1.1 Description du sol en tant que milieu poreux	60

3.1.2	Écoulements en milieux poreux	64
3.2	Les transferts thermiques en milieu poreux	70
3.2.1	Les échanges de chaleur interne	70
3.2.2	Les échanges de chaleur externe	75
3.3	Le régime thermique du sol à faible profondeur	77
3.3.1	Description générale	77
3.4	Modélisation numérique des transferts thermo-hydrauliques dans un ouvrage hydraulique	77
3.4.1	Modèle hydraulique	78
3.4.2	Modèle thermique	80
4	Méthodes de caractérisation des fuites utilisées et application sur des données simulées	89
4.1	Les modèles impulsionnels pour la détection et la quantification	90
4.1.1	Utilisation des méthodes impulsionnelles pour la surveillance des ouvrages hydrauliques	90
4.1.2	Méthode de détection de fuites basée sur le modèle impulsionnel MORITO	92
4.1.3	Quantification à partir de MORITO	100
4.1.4	Tests de MORITO sur des données numériques issues de la simulation thermo-hydraulique d'une digue	103
4.1.5	Synthèse sur les modèles impulsionnels	115
4.2	Le modèle d'analyse journalière pour la quantification	117
5	Test des modèles de caractérisation de fuites sur des données semi-contrôlées issues de la plateforme expérimentale PEERINE	123
5.1	Description de la plateforme expérimentale PEERINE	124
5.1.1	Conception de la plateforme	124
5.1.2	Fonctionnement hydraulique du bassin	127
5.1.3	Description du dispositif de mesures	127
5.2	Programmes expérimentaux	131
5.2.1	Programme amont	131
5.2.2	Programme aval	131
5.3	Analyse des données amont	132
5.3.1	Aperçu des données brutes	132
5.3.2	Analyse AJOUT	134
5.3.3	Analyse MORITO	139
5.4	Analyse des données aval	151
5.4.1	Rappel du programme aval	151
5.4.2	Aperçu des données brutes	152
5.4.3	Analyse AJOUT	154

5.4.4	Analyse MORITO	156
6	Évaluation des modèles de caractérisation de fuites sur site réel : la digue de Kembs	165
6.1	Description de la digue de Kembs	166
6.1.1	Les aménagements hydrauliques de Kembs	166
6.1.2	Description de la portion de digue étudiée : le tronçon d'étude	166
6.1.3	Dispositif de mesures	168
6.1.4	Campagne de mesures	173
6.2	Contexte hydraulique	174
6.2.1	Les charges hydrauliques aux frontières et dans la digue	174
6.2.2	Repérage des fuites par examen visuel	179
6.2.3	Estimation de vitesse par traçage chimique	183
6.3	Contexte thermique	185
6.3.1	Température de l'ouvrage en profondeur	185
6.3.2	Température sous le talus aval : mesures par fibre optique	192
6.4	Résultats Piste	195
6.4.1	Application de AJOUT	195
6.4.2	Application de MORITO	203
6.5	Résultats Contre-Canal	207
6.5.1	Application de AJOUT	207
6.5.2	Application de MORITO	214
6.6	Synthèse des résultats de la campagne de mesures	218
	Conclusions et perspectives	222
	Conclusions sur les modèles utilisés pour la caractérisation des fuites	223
	Discussions sur la position de la fibre optique	224
	Perspectives	225
A	Analyse de fonction de corrélation	229
A.1	Corrélation entre deux signaux	229
A.2	Estimation du temps retard par analyse de corrélation	230
A.2.1	Corrélation de signaux sinusoïdaux périodiques déphasés	230
A.2.2	Méthode de calcul du temps retard	230
B	Estimation de vitesses de fuites à travers la digue de Kembs par mesures de traçage	233
B.1	Injection du traceur et dispositif de mesures	234
B.2	Essais de traçage sur le piézomètre 178.633G1	235
B.2.1	Premier essai : le 21/06/11	235

B.2.2	Deuxième essai : le 22/06/11	237
B.3	Essais de traçage sur le piézomètre 178.633G2 : Essai 3	237
B.4	Essais de traçage sur le piézomètre 178.633G3 : Essai 4	237
B.5	Bilan sur les estimations de vitesses	237
B.5.1	Estimation de vitesses par mesures de temps de parcours	237
B.5.2	Estimation de vitesse à partir de la vitesse des mesures de concentration	240
Bibliographie		243

Liste des symboles

$(\rho c_p)_a$	Capacité calorifique volumique de l'air [$\text{J.m}^{-3}\text{K}^{-1}$]
$(\rho c_p)_w$	Capacité calorifique volumique de l'eau [$\text{J.m}^{-3}\text{K}^{-1}$]
$(\rho c_p)_{sol}$	Capacité calorifique volumique du sol [$\text{J.m}^{-3}\text{K}^{-1}$]
α_L	Dispersivité longitudinale [m]
α_T	Dispersivité transversale [m]
δ	Symbole de Kronecker [-]
δ_{ij}	Symbole de Kronecker [m]
η	Paramètre de forme de la fonction impulsionnelle irfa2 jouant sur la position du maximum [s]
λ_a	Conductivité thermique de l'air [$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
λ_a	Longueur d'onde du pic Anti-Stokes [m]
λ_s	Conductivité thermique de la matrice solide [$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
λ_s	Longueur d'onde du pic Stokes [m]
λ_w	Conductivité thermique de l'eau [$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
λ_{eq}	Conductivité thermique équivalente du sol [$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
μ	Viscosité dynamique [Pa.s]
ν	Viscosité cinématique [m^2s^{-1}]
ϕ	Porosité [-]
Ψ	Potentiel capillaire [Pa]
Ψ_g	Potentiel de gravité [Pa]
Ψ_p	Potentiel de pression [Pa]
Ψ_{ph}	Potentiel de pression hydrostatique [Pa]
Ψ_{pm}	Potentiel de pression matricielle [Pa]

ρ_f	Masse volumique du fluide [Kg.m ⁻³]
ρ_w	Masse volumique de l'eau [kg.m ⁻³]
σ	Paramètre de forme de la fonction impulsionnelle irfa2 jouant sur la position du maximum [s]
τ	Temps caractéristique de diffusion [s]
τ	Temps caractéristique de diffusion [s]
θ	Teneur en eau [-]
θ_r	Teneur en eau résiduelle [-]
θ_r	Teneur en eau à saturation [-]
\vec{v}_D	Vitesse de Darcy [ms ⁻¹]
a	Diffusivité thermique [m ² /s]
c	Vitesse de la lumière [ms ⁻¹]
d_p	Paramètre de détection [°C]
d_e	Paramètre écart [°C]
e	Indice des vides [-]
g	Accélération de la pesanteur [ms ⁻¹]
H	Charge hydraulique [m]
h	Charge de pression [m]
h	Réponse impulsionnelle [s ⁻¹]
h_p	Constante de Planck [J.s]
h_{air}	Réponse impulsionnelle relative à l'air [s ⁻¹]
h_{eau}	Réponse impulsionnelle relative à l'eau [s ⁻¹]
h_{exp}	Fonction impulsionnelle basée sur l'approximation exponentielle [s ⁻¹]
h_{irfa2}	Fonction impulsionnelle basée sur l'approximation irfa2 [s ⁻¹]
K	Coefficient d'atténuation de la fonction impulsionnelle exponentielle [-]
k	Constante de Boltzman [JK ⁻¹]
k	Perméabilité intrinsèque [m ²]
K_r	Conductivité relative [-]
K_s	Conductivité hydraulique à saturation [ms ⁻¹]

L	Longueur caractéristique de l'écoulement [m]
Pe	Nombre de Péclet [-]
Q	Débit [m^3s^{-1}]
R_c	Rapport des capacités calorifiques volumiques de l'eau et du sol [-]
S	Surface [m^2]
S_0	Compressibilité du volume de stockage [m^{-1}]
T	Température [$^{\circ}\text{C}$]
t	Temps [s]
T_{air}	Température de l'air [$^{\circ}\text{C}$]
T_{eau}	Température de l'eau [$^{\circ}\text{C}$]
t_r	Temps retard estimé par MORITO [s]
V_s	Volume de la matrice solide [m^3]
V_T	Volume total [m^3]
V_V	Volume des vides [m^3]
V_w	Volume d'eau [m^3]
v_f	Vitesse de l'écoulement [ms^{-1}]
v_T	Vitesse thermique [ms^{-1}]
$\overline{d_p}$	Moyenne temporelle du paramètre de détection [$^{\circ}\text{C}$]
\overline{T}	Température estimée [$^{\circ}\text{C}$]

Introduction

En France, le parc hydraulique compte près de 600 grands barrages (CFBR, 2011) et plusieurs milliers de petits barrages. Plus de quinze milles kilomètres de digues complètent ce vaste parc :

- 7500 km de digues de protection contre les crues (Serre, 2005)
- 6700 km de digues de canaux de navigation (Daly, 2004)
- 1000 km de canaux hydroélectriques (Serre, 2005)

La grande majorité des digues et 45% des grands barrages sont des ouvrages en remblai (CFBR, 2011).

La plupart des digues ont plus d'un siècle et les barrages un demi-siècle. L'âge avancé des ouvrages augmente leur vulnérabilité aux fuites qui témoignent directement d'un dysfonctionnement de l'étanchéité de l'ouvrage. La rupture d'un ouvrage hydraulique, synonyme de perte totale d'étanchéité, peut avoir des conséquences humaines, économiques et environnementales considérables. Heureusement, les ruptures de grands barrages sont assez rares. Concernant les petits ouvrages, l'ampleur des dégâts est certes moindre mais non négligeable. Or cette catégorie d'ouvrages, moins surveillée du fait de son plus faible enjeu de sécurité, enregistre un taux de ruptures beaucoup plus fort. Ces dix dernières années, la fréquence de ruptures de ces petits ouvrages (petits barrages, digues de protection contre les crues et digues de canaux) est d'environ une rupture par an. Les événements survenus dans le Bas-Rhône illustrent l'impact associé aux ruptures de digues :

- Les brèches de la crue du Gard du 9 septembre 2002, ont coûté la vie à 5 personnes dans le village d'Aramon et occasionné des dégâts équivalents à 1200 millions d'euros.
- La crue du Rhône de décembre 2003, responsable de plus de 100 points de désordre, dont une demie-douzaine de brèches, a causé 845 millions d'euros de dégâts sur cinq départements.

La surveillance des ouvrages hydrauliques, imposée et contrôlée par l'État, est primordiale pour assurer la sécurité des biens et des personnes. Elle débute dès la mise en eau de l'ouvrage et se poursuit tout au long de sa vie. La surveillance repose sur l'examen visuel régulier, la vérification périodique des organes de sécurité et l'auscultation (suivi du comportement à moyen et long terme d'un barrage face aux charges qui lui sont appliquées et face à son propre vieillissement).

Le comportement d'un barrage est caractérisé par un ensemble de paramètres mécaniques

(déplacements, déformations) et hydrauliques (pression, débit de fuite). Ces paramètres, témoins du comportement, doivent être régulièrement mesurés à l'aide d'une instrumentation adaptée. L'analyse des données recueillies, mises en rapport avec les mesures passées, permet alors d'émettre un jugement sur le comportement de l'ouvrage et son évolution.

La surveillance des digues, ouvrages à long linéaire, est à différencier de celles des barrages. Une digue est une construction établie dans le but de contenir des eaux ou de se protéger de leurs effets (définition extraite de (Lepetit, 2002)). On distingue deux familles de digues : les digues de protection contre les inondations et les digues soumises à une charge permanente. Les spécificités de ces ouvrages compliquent leur surveillance à cause de :

- La diversité des propriétaires et gestionnaires : Le contrôle de la surveillance n'est pas facilité d'autant plus que le recensement des ouvrages intéressant la sécurité publique et de leurs propriétaires n'est pas exhaustif.
- L'âge avancé de ces ouvrages : Les dégradations des dispositifs d'étanchéité (fissures, joints défectueux) rendent l'ouvrage plus vulnérable, notamment vis-à-vis de l'érosion interne.
- La grande longueur des digues :
 - les digues sont généralement réalisées avec les matériaux en place. La composition de ces ouvrages varie suivant la présence des matériaux en place, ce qui complique les diagnostics.
 - La surveillance ne peut être aussi dense que sur un barrage. Les inspections visuelles, parfois complexes, puisque gênées par la végétation, constituent l'essentiel de la surveillance. Souvent l'instrumentation se limite à des piézomètres qui sont répartis sur tout le linéaire (tous les 200 m sur les digues du Rhône (Tratapel, 2004)). Elle peut être plus dense et diversifiée aux points diagnostiqués sensibles.

La détection de fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai, par mesures de températures, est étudiée depuis de nombreuses années (Kappelmeyer (1957); Birman *et al.* (1971); Armbruster et Merkler (1982); Johansson (1991)). Ces quinze dernières années, les recherches dans ce domaine se sont orientées vers l'utilisation d'un nouvel outil de mesure de la température, pour la détection des fuites dans les ouvrages hydrauliques (?Johansson *et al.* (2000); Fry (2004)) : la fibre optique. Au regard des spécificités de surveillance des digues mentionnées précédemment, l'utilisation de la fibre optique, qui peut être assimilée à une série de capteurs thermiques répartis sur toute la longueur de la fibre, apparaît adaptée aux problématiques de la surveillance des digues et plus spécifiquement de la surveillance des fuites. Grâce à cet outil, des mesures, avec à un pas spatial de l'ordre du mètre, peuvent être obtenues avec une précision de l'ordre de 0,01°C(Tyler *et al.*, 2009).

L'exploitation des données de température pour la caractérisation des fuites à travers les ouvrages en remblai, i.e. leur détection et leur quantification, nécessite l'emploi de méthodes spécifiques. Un travail important a été mené sur les méthodes de détection (Johansson (1997); Porras Velásquez (2007); Perzlmaier (2007); Guidoux (2007); Radzicki (2009); Khan (2009)).

Concernant la quantification, la littérature est moins fournie. Deux méthodes sont à retenir :

- la méthode de Perzlmaier (2007) ; elle s'applique au traitement des mesures de température dites « actives » et nécessite une chauffe du milieu environnant le capteur (2.2.3.1). Ces mesures sont coûteuses en énergie et requièrent une instrumentation lourde.
- la méthode de Johansson (1997) ; cette méthode utilise la propagation des fluctuations annuelles de température (2.2.3.2), l'historique de données nécessaire doit être supérieur à un an. La méthode est inadaptée pour caractériser les fuites lorsque l'influence de la température de l'air est ressentie au niveau du capteur et lorsque la fuite évolue vite.

Comme nous le verrons (2.2.3.1), les mesures actives sont d'une part, coûteuses en énergie électrique et d'autre part, nécessitent une instrumentation assez lourde. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur les mesures dites « passives ».

Les mesures de température par fibre optique peuvent être implémentées dans les nouveaux ouvrages mais aussi dans ceux existants. Pour ces derniers, deux positionnements sont envisageables (2.2.2.2) : la fibre peut être enfouie, soit sous le talus amont (position amont), soit en pied de talus aval (position aval), à faible profondeur. A l'aval, la température mesurée par la fibre optique est fortement influencée par la température de l'air. La méthode de Johansson (1997) est alors inappropriée pour la caractérisation des fuites.

Dans cette étude, nous proposons d'étudier la caractérisation des fuites, i.e. leur détection et quantification, par mesures de températures naturelles du sol (dites mesures « passives ») pour des capteurs thermiques en position amont ou aval.

Dans un premier temps, nous reviendrons sur l'importance de la surveillance des fuites pour les ouvrages en remblai (Chap.1). Ensuite, les méthodes existantes de caractérisation des fuites seront présentées (Chap.2). Puis notre regard se portera exclusivement sur les méthodes thermométriques. Les principes physiques et mathématiques expliquant le couplage entre les écoulements et les mesures de température seront décrits (Chap.3). Les échanges thermo-hydrauliques à l'intérieur d'une digue, à géométrie simple, seront simulés à l'aide d'un modèle numérique 2D, aux éléments finis. Ce modèle permettra d'obtenir des données synthétiques et d'examiner l'influence de la température de l'air et de l'eau sur la température dans l'ouvrage. Alors seront présentés les deux modèles de caractérisation de fuite, utilisés dans cette étude (Chap.3). Le premier modèle, développé au cours de ces travaux, comme le second, développé, à l'origine, dans un but de détection par Khan *et al.* (2010), seront testés sur les données synthétiques (Chap.3). Enfin les deux modèles seront éprouvés sur des données de température issues d'un modèle physique, le bassin expérimental d'Aix en Provence (plateforme PEERINE), et d'un site non contrôlé, la digue de Kembs (Chap.5 et Chap.6). Les résultats obtenus nous permettront de conclure quant à l'estimation de vitesses de fuite par mesures de température.

L'importance de la surveillance des fuites pour les ouvrages en remblai

Cette étude porte sur la caractérisation des fuites à travers les ouvrages hydrauliques en remblai par mesure de température. Avant d'aborder les méthodes de détection des fuites, nous proposons dans ce chapitre un descriptif des ouvrages en remblai et de leurs principales pathologies. Certaines pathologies altèrent l'étanchéité de l'ouvrage et génèrent des fuites, témoins directs d'un dysfonctionnement. Une description des fuites à travers les ouvrages en remblai sera donnée.

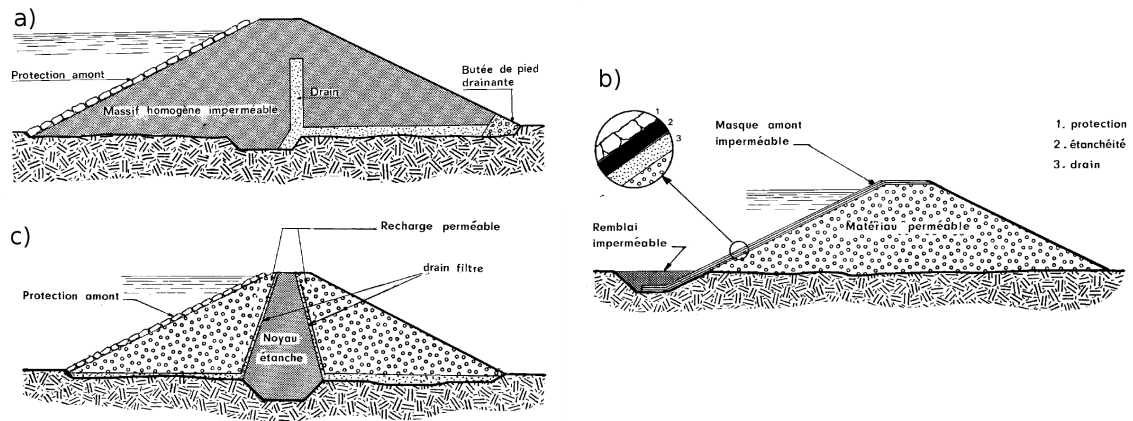


FIGURE 1.1.1: Différents types de barrage en remblai (extrait de Lepetit (2002))

1.1 Définition des ouvrages en remblai

Les barrages en remblai sont constitués d'un matériau meuble, qu'il soit très fin (argile) ou très grossier (enrochement). Les différents types de barrage en remblai proviennent des types de matériaux utilisés et de la méthode employée pour l'étanchéité. Ces différents types se regroupent en trois catégories : les barrages homogènes, les barrages à noyau et les barrages à masques.

Les barrages homogènes Le barrage homogène (Fig. 1.1.1-a) est un barrage en remblai construit avec un matériau suffisamment étanche (argile ou limon). C'est la technique la plus ancienne de barrages en remblai.

Les barrages à masque L'étanchéité des barrages à masque (Fig. 1.1.1-b) est assurée par une couche imperméable (appelée masque) placée sur le parement amont. Les masques peuvent être de nature très différente : béton, béton bitumineux, ciment ou encore géomembrane.

les barrages à noyau Le barrage à noyau (Fig. 1.1.1-c) est constitué en son centre d'un matériau de très faible perméabilité, le noyau, conforté à l'amont et à l'aval par des couches de matériaux plus grossiers, les recharges. Le noyau assure l'étanchéité de l'ouvrage tandis que les recharges assure la stabilité. Un filtre protège le noyau à l'interface avec les recharges amont et aval.

1.2 Les mécanismes de rupture des ouvrages en remblai

On distingue trois principaux mécanismes de rupture des ouvrages en remblai (Fig. 1.2.1) : l'érosion externe, l'érosion interne et le glissement de talus (instabilité). Foster *et al.* (2000) ont mené une étude statistique sur les ruptures des grands barrages. Il en ressort que 48% des ruptures sont dues à l'érosion externe, 46% à l'érosion interne et 6% à des glissements. Une

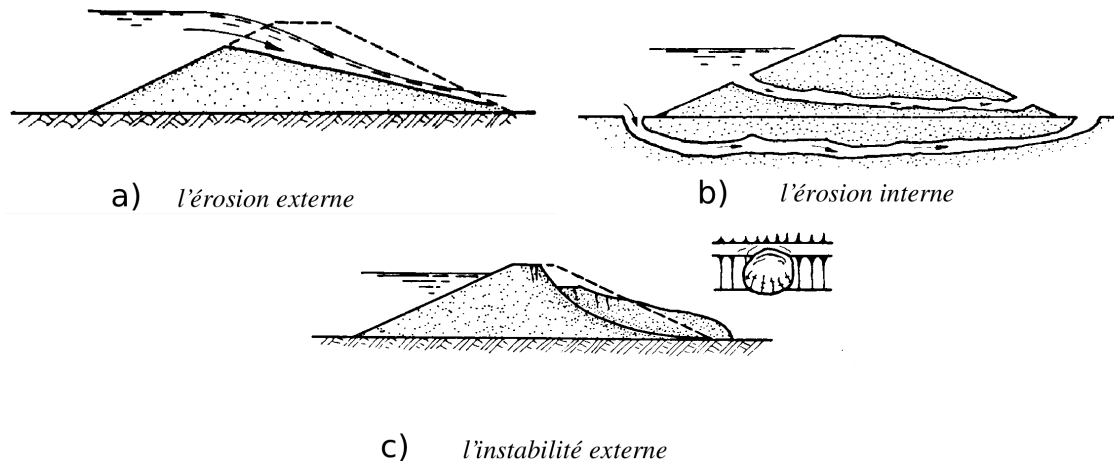


FIGURE 1.2.1: Différents mécanismes de rupture des ouvrages en remblai (extrait de Lepetit (2002))

attention particulière sera donnée à la description du phénomène d'érosion, très fortement en lien avec les fuites.

1.2.1 L'érosion externe

L'érosion externe est causée par un écoulement à la surface de l'ouvrage qui provoque l'arrachement et le transport des particules de sol.

Ce phénomène d'érosion est particulièrement dommageable lorsqu'il y a surverse i.e. submersion de l'ouvrage par une lame d'eau (Fig. 1.2.3). Les ouvrages en remblai ne sont généralement pas conçus pour résister à une surverse. Si elle se produit, la lame d'eau submergeant l'ouvrage érode la surface externe et peut très rapidement conduire à la formation d'une brèche (Figure 1.2.2). Les crues sont les principales causes de submersion des ouvrages. Le risque de crue est intégré dès la conception. Les ouvrages sont conçus pour résister à une crue dont la fréquence est très limitée¹. Ils disposent souvent d'évacuateurs de crues qui permettent lors de celles-ci un transit de débit important et évitent la submersion de l'ouvrage. Certaines digues sont équipées de déversoirs à seuil libre. A ces endroits, la crête de digue, revêtue d'un matériau résistant aux écoulements, est de plus faible hauteur, ce qui permet d'évacuer un trop plein d'eau. A l'aval des déversoirs, le parement de la digue est renforcé (maçonnerie) pour éviter tout risque d'érosion externe. En pied de digue, un radier renforcé est construit pour dissiper l'énergie de l'écoulement. L'érosion de surface peut aussi avoir lieu côté amont, sous l'effet du courant (pour les digues) et des vagues (batillage). Certains facteurs, cités par Fauchard et Mériaux (2004) favorisent le développement d'érosion externe :

- L'absence de végétation herbacée : les systèmes racinaires de la couverture végétale favorisent l'ancrage des particules de sol,
- La présence de matériaux pulvérulents (sableux) sur la surface externe ,

1. Généralement, les grands ouvrages en remblai sont conçus pour résister à des crues dont la période de retour est estimée à 10 000 ans



FIGURE 1.2.2: Cas de rupture par surverse sur le Vidourle (Gard), extrait de Serre (2005)

- Les irrégularités topographiques : les écoulements se concentrent dans les dépressions de la digue (dus à des défauts de nivellement, à des tassements différentiels).

1.2.2 L'érosion interne

1.2.2.1 Définition de l'érosion interne

L'érosion interne est définie comme l'entraînement vers l'aval des particules constitutives du remblai ou de la fondation sous l'action d'un écoulement (Serre, 2005). Pour que l'érosion interne se produise, deux conditions doivent être réunies : l'arrachement de grains de sol et leur transport. Le phénomène d'érosion interne est évolutif et peut conduire à la ruine de l'ouvrage.

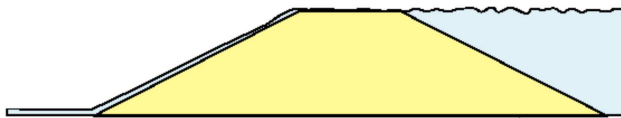
1.2.2.2 Initiation de l'érosion : arrachement des particules de sol

Différents mécanismes peuvent conduire à l'arrachement de particules et donc à l'initiation de l'érosion. Foster et Fell (1999) distinguent quatre mécanismes dépendant de la structure et de la composition du massif de sol rencontré (Figure 1.2.4) :

- l'érosion interne de conduit ou de fissure : Ce type d'érosion se rencontre lorsque un écoulement circule dans une cavité ou à l'intérieur d'une fissure.
- l'érosion interne régressive : Lorsque le gradient hydraulique dépasse un certain seuil, fonction du type de sol, les forces hydrodynamiques peuvent annuler la contrainte effective des grains situés à l'exutoire de l'écoulement. Ceux-ci sont alors emportés par le flux d'eau.
- l'érosion interne de contact : Elle se produit à l'interface d'un sol fin et d'un sol grossier. Dans cette zone d'interface, la compaction des fines est moindre et elles sont soumises à des vitesses plus élevées.
- la suffusion : Les particules fines du sol sont entraînées et sont libres de se mouvoir à travers les vides des particules grossières d'un sol à la granulométrie discontinue.

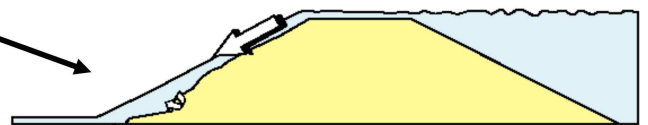
Début de la surverse :

Le niveau du fleuve atteint la crête de l'ouvrage, l'eau déborde sur la digue et inonde le val.



Quelques minutes après :

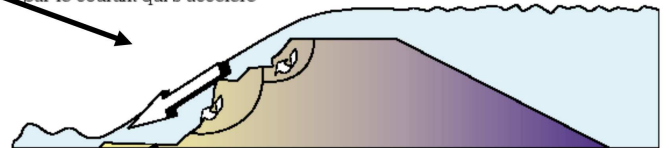
Le parement aval commence à s'éroder, les matériaux sont arrachés par la force du courant en pied de digue.



Le parement de la digue est fortement dégradé,
une fouille importante s'est créée en pied,
l'ouvrage est imbibé d'eau.



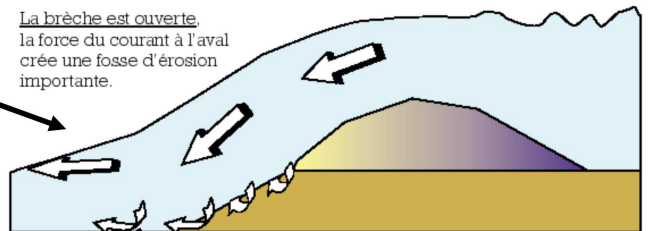
Le parement aval saturé n'est plus stable,
il glisse par pans entiers.
Les matériaux sont rapidement emportés
par le courant qui s'accélère



Le processus de dégradation s'accélère,
les matériaux sont arrachés par la force du courant
entraînant la ruine complète.



La brèche est ouverte,
la force du courant à l'aval
crée une fosse d'érosion importante.



La brèche s'élargit
en érodant la digue de part et d'autre.

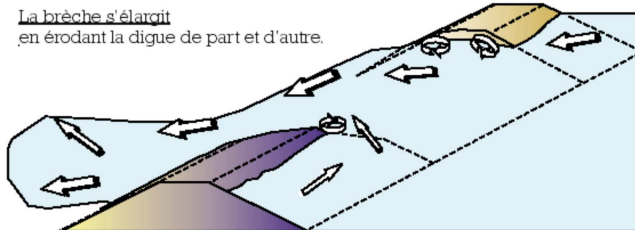


FIGURE 1.2.3: Mécanismes de rupture par surverse (Mériaux *et al.*, 2004)


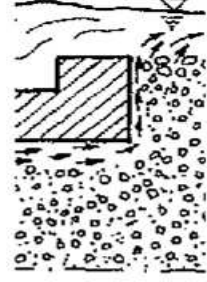
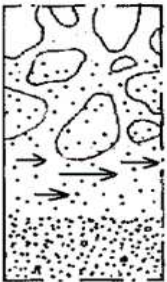
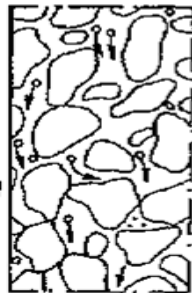
Érosion interne de conduit ou de fissure		Érosion interne régressive	
	Entraînement des particules des lèvres de la fissure ou de la surface de la cavité sous l'action de l'écoulement de l'eau		Entraînement des particules sous une surface cohésive ou rigide à l'exutoire de l'écoulement souterrain, d'abord à la paroi aval et ensuite au fond du conduit creusé de l'aval vers l'amont
Erosion interne de contact		Suffusion	
	Entraînement des particules d'un sol fin le long de son contact avec un sol grossier par l'écoulement traversant le sol grossier		Entraînement des particules fines libres de se mouvoir à travers les vides des particules grossières d'un sol à la granulométrie discontinue

FIGURE 1.2.4: Les quatre mécanismes d'érosion interne

Un ensemble de conditions favorise l'initiation et le développement de l'érosion interne. Ces conditions dépendent de :

- la susceptibilité du sol à l'érosion : La granulométrie influence sa capacité d'auto-filtration du sol.
- l'importance des forces hydrodynamiques : Plus les vitesses d'écoulements sont élevées, plus le risque d'arrachement augmente.
- la valeur des contraintes effectives : Si les grains de sol sont mal confinés, l'arrachement des grains se produira plus facilement.

1.2.2.3 Modes de transport du sol érodé et modes de rupture associés

Lorsque l'érosion interne est initiée, les particules les plus fines sont arrachées. Pour que l'érosion se poursuive, les particules arrachées doivent être transportées. Deux phénomènes de transport sont à distinguer (Fry, 2009) : le transport concentré dans un conduit, le renard, et le transport diffus dans l'espace poreux interparticulaire, la suffusion. Le premier type de transport est caractérisé par des vitesses rapides et une évolution rapide. Lorsque le renard est amorcé, un conduit traversant l'ouvrage peut se développer d'aval en amont en quelques heures. On parle d'érosion régressive. Une fois le conduit formé, la rupture survient très



FIGURE 1.2.5: Rupture du barrage de Teton suite à la formation d'un renard

rapidement. La rupture du barrage de Téton en 1976 illustre la rapidité du phénomène de renard (Seed et Duncan, 1987) : de l'apparition de fuites jusqu'à la formation d'une brèche : deux jours avant la rupture du barrage de Téton en 1976, des fuites avaient été repérées. Le jour de la rupture, les fuites se sont soudainement renforcées et ont conduit, en quelques heures, à la formation d'une brèche (Figure 1.2.5).

Le second type de transport, déjà évoqué dans les mécanismes d'érosion, a une cinétique plus lente. Le sol se vide peu à peu des particules les plus fines qui le composent. Seules les plus grosses, appelées particules structurales subsistent. Le sol lessivé de ses fines présente alors une perméabilité plus élevée. Si les fines sont évacuées à l'extérieur de l'ouvrage, les vitesses augmentent, ce qui tend à aggraver le phénomène d'érosion. Si les fines sont retenues et se colmatent, les pressions interstitielles vont localement augmenter risquant d'altérer la stabilité de l'ouvrage.

1.2.3 Le glissement de talus

Le glissement de talus peut concerner le parement aval et le parement amont. Des glissements du talus aval peuvent survenir lorsque celui-ci est saturé. Les risques de glissement sont d'autant plus grands que :

- les pentes du talus sont fortes (pentes supérieures à $2/3$),
- les pressions interstitielles sont élevées : ce peut être le cas si l'ouvrage ne contient pas d'organe de drainage ou si ceux-ci sont colmatés,
- les caractéristiques mécaniques du sol, angle de frottement, cohésion, compaction, ...

sont faibles

Des instabilités côté amont peuvent être observées lors d'un abaissement brutal du niveau d'eau. Ces baisses rapides de niveau d'eau peuvent survenir suite à une période de fort turbinage, lors de la vidange du réservoir (pour inspection ou réparation) ou pour préparer une période de chômage (pour les canaux). Ces instabilités s'expliquent par une non dissipation des pressions interstitielles après la disparition de la charge d'eau sur le parement amont.

1.3 Description des fuites dans les ouvrages en remblai

Par la suite, on appellera fuite tout écoulement à travers un ouvrage hydraulique. Les causes de fuites peuvent être multiples :

- perméabilité naturelle de l'ouvrage (on parle de débit de fuite de « service »),
- fissuration du masque ou du corps pour les ouvrages en béton,
- défauts des joints,
- fissuration des appuis,
- infiltrations et phénomènes d'érosion interne et externe sur les barrages en remblai.

Hormis les fuite de « service », les fuites sont révélatrices d'un dysfonctionnement de la fonction d'étanchéité de l'ouvrage.

1.3.1 Description d'une fuite

1.3.1.1 Description de la fuite à l'amont

Les points d'infiltration amont, aussi appelés points d'entonnement, ne sont pas évidents à repérer. La première difficulté est d'ordre pratique : le parement amont est noyé donc les désordres ne sont pas facilement visibles (vidange, lorsque c'est possible ou inspection à l'aide d'un robot). Lorsqu'un ouvrage en remblai présente des fuites qui exigent des réparations, souvent les travaux ne visent pas directement la cause, trop difficile à cerner, mais ont pour but de barrer les chemins d'écoulement : injection de béton, rideau de palplanche.

Parfois, certains signes extérieurs témoignent de la présence d'une fuite : un tourbillon (vortex) peut être visible lorsqu'une quantité d'eau importante s'infiltré localement dans l'ouvrage.

1.3.1.2 Description de la fuite dans le corps de l'ouvrage

Pour un ouvrage hydraulique homogène sans étanchéité amont, la forme des écoulements dans le corps de l'ouvrage est bien connue (Mallet et Pacquant, 1951, Fig. 1.3.1). Une estimation du débit d'infiltration peut être facilement obtenue.

Le problème se complique dès lors que l'ouvrage est constitué de matériaux hétérogènes et/ou qu'il comporte une étanchéité amont. Dans ces cas, l'écoulement à travers l'ouvrage se

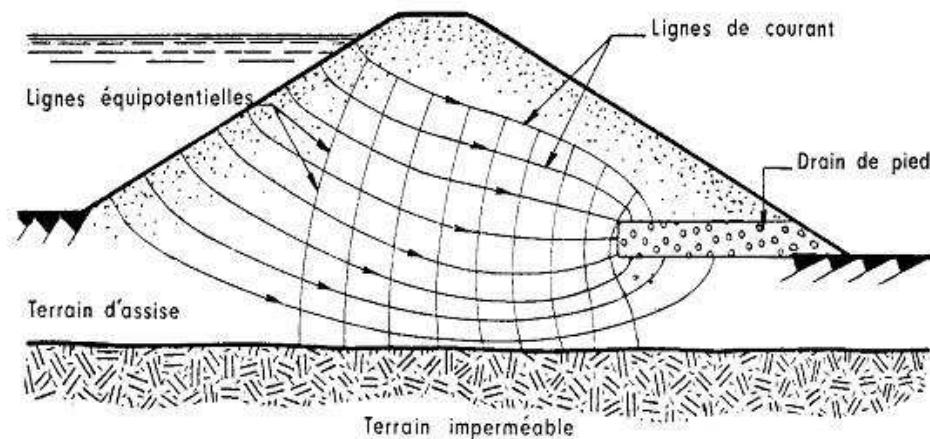


FIGURE 1.3.1: Représentation schématique des écoulements à travers un ouvrage en terre homogène (d'après Mallet et Pacquant, 1951)

fait le long de chemins préférentiels où la perméabilité est localement plus élevée. Plusieurs raisons peuvent expliquer les variations de perméabilité :

- certaines couches ont pu être moins compactées et sont donc plus perméables ; c'est souvent le cas entre deux couches de compactage.
- les matériaux de l'ouvrage sont hétérogènes ; certains matériaux du sol en place, utilisés lors de la construction, sont de plus faible perméabilité. Pour les digues, cette situation est fréquemment rencontrée lorsque les matériaux alluvionnaires ont été utilisés. Par exemple, le sol alluvionnaire des digues du Rhin est un mélange de graves et de sable contenant des lentilles d'argile.

L'érosion interne, si elle se produit, va agrandir les chemins d'écoulements qui prendront une forme cylindrique, si l'érosion évolue vers un renard.

1.3.1.3 Description de la fuite à l'aval

La mesure de débit caractérise l'intensité de la fuite. Si la fuite peut être collectée, deux techniques peuvent être utilisées : les mesures à la capacité, les mesures à l'aide d'un seuil. Les mesures de débit à la capacité consiste à remplir un volume d'eau dans un temps donné pour obtenir une évaluation du débit.

Le débit peut être mesuré à partir d'un seuil. La donnée mesurée est la hauteur d'eau au-dessus du seuil. Cette grandeur est directement en lien avec le débit. Ce type de méthode est adaptée aux fuites localisées et dont le débit est suffisamment important. Pour des fuites diffuses, le caractère ponctuel de la mesure la rend non représentative, à moins d'ajouter pour ce type de fuite, un moyen de drainage. Les ouvrages récents intègrent un dispositif de drainage chargé de collecter les eaux d'infiltration. Les eaux des drains sont ensuite collectées et peuvent être jaugées. Concernant les digues, un canal de drainage, aussi appelé contre-canal ou canal de fuite, est souvent construit en pied aval. Il permet de récolter les eaux d'infiltration du corps

de digue et celles transitant par les fondations. Le suivi du débit du contre-canal à l'entrée et la sortie de différents tronçons permet également d'estimer le débit des fuites en provenance de l'ouvrage. Cette mesure est intégrante, elle renseigne sur le débit de fuite d'un tronçon de digue, mais elle n'est applicable que si les débits de fuite sont importants. De plus, ce type de méthode est inapproprié si des apports secondaires alimentent le contre-canal (ruisseau, nappe phréatique...).

Dans le cas de fuite importante, la présence d'une fuite se manifeste à l'aval de l'ouvrage par des zones humides, des suintements, des résurgences sur le parement aval et/ou le pied de digue aval. Parfois des résurgences sont détectées à une certaine distance de l'ouvrage. Les points de sortie des fuites peuvent être signalés par la présence d'une végétation hydrophile.

Si l'origine de la fuite est l'érosion interne, l'écoulement à sa sortie peut être chargé de fines particules de sol.

1.3.2 Conséquences des fuites :

Une fuite est dommageable pour l'ouvrage si elle remet en cause au moins sa fonction primaire d'étanchéité et génère des instabilités. Une fuite peut être à l'origine d'érosion interne. Les conséquences d'une érosion interne peuvent affecter à la fois l'étanchéité et la stabilité de l'ouvrage. La suffusion, en lessivant le sol de ses fines, modifie petit à petit la perméabilité du sol et donc affecte sa capacité d'étanchéité. Un renard entraîne la création d'un conduit naturel traversant l'ouvrage de part en part. Ce conduit, en s'élargissant sous l'effet de l'érosion, peut déstabiliser l'ouvrage : effondrement du toit du conduit. Une fuite peut entraîner des problèmes de stabilité du parement aval. L'augmentation du niveau d'eau à l'aval modifie l'équilibre du talus : les pressions interstitielles augmentent et le poids des terres est plus important (saturation du sol).

1.3.3 La surveillance des fuites

Détection des fuites Les fuites peuvent avoir des conséquences dommageables pour l'ouvrage, celles-ci allant jusqu'à la rupture. De plus, elles représentent une perte de production. Leur détection est donc essentielle sur les ouvrages à long linéaire, tels que les digues.

La quantification Les fuites détectées doivent être quantifiées si possible et dans tous les cas, un suivi dans le temps doit être mené. La quantification n'est possible que si le débit est suffisant : une zone humide ne peut être quantifiée, en revanche, il faut organiser un suivi de cette zone. La quantification permet d'évaluer la dangerosité de la fuite ou son impact sur la production. C'est un critère décisionnel important pour le lancement de réparation. L'évolution du débit de fuite dans le temps est riche en informations sur le comportement de l'ouvrage. La diminution du débit de fuite révèle un colmatage des chemins de fuites. Le colmatage, s'il se produit du côté aval de l'ouvrage, peut avoir des conséquences néfastes vis-

à-vis de la stabilité de l'ouvrage. En effet, le colmatage des chemins de fuite va entraîner une augmentation des pressions qui peut déboucher sur des problèmes d'instabilité. Un colmatage à l'amont est bénéfique. Il augmente la capacité d'étanchéité de l'ouvrage. La stabilisation du débit de fuite traduit l'absence d'érosion interne. L'augmentation du débit est signe d'une érosion interne évolutive. De plus en plus de particules de sol sont arrachées et transportées, ce qui conduit à une augmentation de la perméabilité et donc du débit de fuite.

Conclusion

En France, les ouvrages en remblai constituent une part importante du parc hydraulique. Ce type d'ouvrage est particulièrement sensible aux fuites. Celles-ci peuvent entraîner une dégradation progressive, ou parfois très rapide (phénomène de renard) de l'ouvrage que ce soit par érosion interne ou par instabilité globale (glissement de talus). La détection et la caractérisation de ces écoulements potentiellement néfastes pour l'ouvrage apparaissent nécessaires pour garantir la pérennité de l'ouvrage. Dans le chapitre suivant, les méthodes de détection et quantification des fuites existantes seront présentées.

Méthodes de détection des fuites

Ce chapitre présente un ensemble de méthodes utilisées pour la détection des fuites, à travers les ouvrages hydrauliques en remblai.

Les méthodes conventionnelles de surveillance des fuites se basent sur le suivi de la charge piézométrique, du niveau de pression interstitielle et du débit de fuite dans les organes de drainage. Leur simplicité et leur robustesse justifient leur utilisation pour la surveillance. Ces méthodes largement documentées dans la littérature ne seront pas présentées dans ce document. Après avoir introduit les méthodes issues de la géophysique appliquée sensibles aux écoulements, notre attention se portera sur les méthodes thermométriques. Certaines sont déjà fréquemment utilisées pour le diagnostic d'ouvrage, d'autres commencent à être employées dans le domaine de la surveillance.

2.1 Les méthodes géophysiques

2.1.1 La méthode de résistivité électrique

2.1.1.1 Principe de la méthode

La résistivité électrique est l'inverse de la conductivité électrique et correspond à l'aptitude d'un matériau à empêcher les charges électriques de se déplacer librement, autrement dit à permettre le passage du courant électrique.

La résistivité électrique du sol dépend principalement de la porosité, de la saturation et de la composition du sol, notamment sa teneur en argile (Johansson, 1997; Beck, 2008). Ces dépendances font de la mesure de résistivité électrique une méthode de caractérisation des sols utilisée en géotechnique.

Le principe de la méthode consiste à injecter un courant électrique continu ou alternatif à basse fréquence dans le sol à l'aide de deux électrodes. Deux autres électrodes, également implantées dans le sol, permettent de mesurer une différence de potentiel ΔV (Volt). Les quatre électrodes forment un quadripôle schématisé Fig. 2.1.1. La mesure de potentiel couplée à la mesure d'intensité I (Ampère) du courant injecté permet de mesurer la résistivité apparente du sol ρ_a :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

Cette dernière est proportionnelle au rapport de la différence de potentiel sur l'intensité du courant injecté. Le coefficient de proportionnalité K est un facteur géométrique fonction du positionnement des électrodes (Parasnis, 1996; Kunetz, 1966). La profondeur d'investigation des méthodes électriques varie en fonction de l'espacement inter-électrodes et est de l'ordre de 1/6ème à 1/8ème de la longueur du dispositif (Fauchard et Mériaux (2004)).

2.1.1.2 Types de mesures utilisées pour les digues

La prospection du champ de résistivité d'une zone peut être réalisée par différentes méthodes :

- le traîné électrique : la taille du réseau d'électrodes est fixe (espace inter-électrodes constant) mais est déplacé sur toute la zone de prospection
- le sondage électrique : après chaque mesure, les électrodes sont progressivement éloignées les unes des autres pour augmenter l'épaisseur de terrain prise en compte
- le panneau électrique : c'est une combinaison des deux méthodes précédentes. Des électrodes sont implantées sur toute la zone d'investigation. Le panneau peut être déployé en travers de l'ouvrage ou en long. Une électrode peut à la fois jouer le rôle d'injection ou de mesure de potentiel. La mesure est pilotée par un ordinateur qui réalise la combinaison des interrogations. Dans le cas des digues, qui présentent un caractère hautement 3D entraînant la formation d'artéfacts dans les résultats d'imagerie conventionnelle (1D ou 2D), des électrodes perpendiculaires au profil en long peuvent être utilisées.

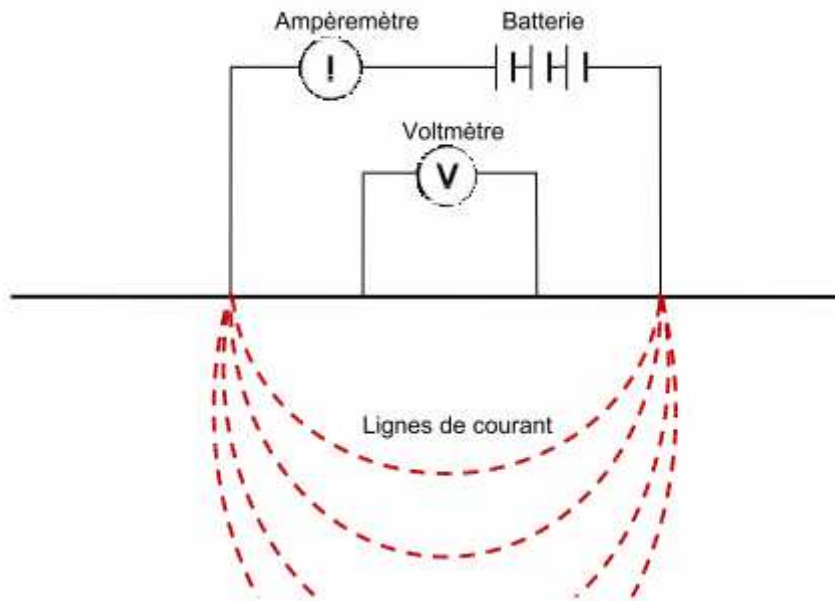


FIGURE 2.1.1: Principe de mesure de la résistivité du sol : le quadripôle d'électrodes.

2.1.1.3 Exploitation des mesures de résistivité électrique

La mesure de résistivité apparente (mesure brute) intégrant l'ensemble du volume investigué par le quadripôle, ne permet pas d'obtenir une coupe représentative du milieu investigué et donc la détection et la localisation exacte d'anomalies. Une méthode d'inversion est alors utilisée pour obtenir une cartographie 2D ou 3D de résistivité du sous-sol. La méthode d'inversion qui repose sur une modélisation du milieu et donc sur un certain nombre d'hypothèses introduit des incertitudes. Fauchard et Mériaux (2004) préconisent de vérifier la localisation en profondeur des anomalies détectées sur la carte de résistivité par des sondages géotechniques.

Récemment, afin de prendre en compte le caractère 3D des digues, Fargier (2011) a développé une stratégie d'inversion des données permettant de garder la simplicité d'acquisition de profils 2D (panneaux électriques) tout en intégrant dans la détermination du problème inverse la topographie de l'ouvrage ainsi que la présence d'un réservoir d'eau.

Le panneau électrique donne des informations de résistivité sur l'ensemble du corps de la digue. Ces informations permettent de zoner la répartition des matériaux dans la digue en distinguant les matériaux fins, peu résistifs, des matériaux grossiers, plus résistifs.

La résistivité varie en fonction de la température. La température du réservoir présente une évolution saisonnière de forme sinusoïdale. En cas de fuite, cette tendance sinusoïdale est propagée au sein de l'ouvrage, le long du chemin d'écoulement et à son voisinage. L'énergie thermique transportée par l'écoulement assure la connexion thermique avec le réservoir. Les mesures de résistivité, liées à celles de température, présentent alors une évolution sinusoïdale (Johansson, 1997).

Le suivi dans le temps de la résistivité de l'ouvrage peut être un indicateur de détection : s'il y a fuite, alors une tendance sinusoïdale pourra être détectée. L'amplitude et la phase de cette sinusoïde, comparées à celles du réservoir, fournissent des informations sur l'intensité de la fuite.

2.1.2 Méthodes électromagnétiques basse fréquence (EM-BF)

Il s'agit de méthodes sensibles à la résistivité électrique du sol et permettant de couvrir un linéaire très important (i.e. méthodes à grand rendement). Ces méthodes étudient la réponse d'un sol à un champ magnétique primaire généré à une fréquence donnée (autour de la dizaine de kilohertz), provoqué via une bobine d'induction, reliée à une source oscillante (méthodes dites slimgram). Lorsque le champ primaire rencontre une hétérogénéité conductrice dans le sol, des courants sont induits par la composante magnétique du champ primaire dans le corps conducteur. Les circulations de ces courants induits créent un champ secondaire dans le sol qui est mesuré au niveau de la bobine réceptrice (Fauchard *et al.*, 2004). Sur le même principe de fonctionnement, d'autres méthodes exploitent la réponse du sol à une source lointaine non provoquée (ex. méthode Radio Magnéto Tellurique (RMT)). Cependant, ces méthodes proposent une résolution spatiale limitée, due à leur utilisation en grand rendement et sont préférentiellement utilisées pour effectuer un zonage d'un corps de digue, afin d'identifier les zones à surveiller avec d'autres méthodes. Retenons également que le repérage des zones d'écoulement à travers une digue par la méthode Willowstick (ou Aquatrack), récemment développée, fonctionne en mesurant, depuis la surface, la réponse magnétique provoquée par la circulation d'un courant alternatif provoqué, à faible voltage, à travers la zone d'étude.

Notons que les méthodes électromagnétiques haute fréquence (EM-HF), comprenant le radar géologique, permettent de caractériser la permittivité et la conductivité électrique du sol, sensibles à l'état du sol (Beck, 2008). Néanmoins, l'atténuation des ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs est une limite d'utilisation de ces méthodes qui sont de ce fait inadaptées pour la plupart des digues en charge, bien souvent composées d'un noyau argileux.

2.1.3 Méthode de potentiel spontané (PS)

2.1.3.1 Principe

La méthode de mesure du potentiel spontané (PS) consiste en la mesure de la distribution de potentiel électrique naturel à la surface du sol. Le principe de mesure du potentiel spontané est très simple : il consiste à mesurer la différence de potentiel entre deux électrodes plantées dans le sol. L'exploitation des mesures est cependant plus complexe. En effet, de nombreux mécanismes génèrent un potentiel spontané : les mécanismes thermo-électriques, électrochimiques et électrocinétiques (Sheffer *et al.*, 2009). En milieu poreux, un écoulement d'eau génère, par mécanismes électrocinétiques, un champ électrique appelé potentiel d'élec-

trofiltration. Ce champ est mesurable en surface au moyen d'électrodes. Des développements théoriques récents ont été apportés quant au lien existant entre le signal électrique mesuré et l'écoulement d'eau en milieu poreux (Boleve (2009)). Ce dernier auteur a montré, dans le même ouvrage, que la localisation des écoulements par PS pouvait être améliorée, en apportant une modification volontaire (injection de saumure) des paramètres hydriques et/ou électriques du problème.

2.1.3.2 Détection et quantification par PS

La distribution du potentiel spontané dans un ouvrage est fonction du champ de vitesse des écoulements ainsi que de la résistivité du sol. Vitesses et résistivités apparaissent comme deux paramètres de l'équation régissant la distribution de potentiel. Les mesures de polarisation spontanée fournissent une observation de la distribution du potentiel. A partir de ces mesures, il est possible de déterminer, par méthode inverse, le champ de vitesse. Boleve (2009) a développé une telle méthode et l'a appliquée avec succès sur un ouvrage. Les résultats du modèle inverse ont montré la présence d'une anomalie de courant à une profondeur donnée. Des mesures de perméabilité, le long d'un forage vertical, ont confirmé la présence d'une zone plus fortement perméable. Les estimations de débit de fuite de Boleve (2009), autour de 3 l/min, sont cohérentes avec les mesures réalisées sur le terrain comprises entre 1 l/min et 10 l/min.

2.2 Méthodes thermométriques pour la détection et la quantification des fuites

2.2.1 Principe de détection des fuites par méthodes thermométriques

La détection de fuite par méthodes thermométriques est utilisée depuis plus de 20 ans dans le domaine des digues et des barrages en remblai (Armbruster *et al.*, 1989; Johansson, 1991). Le principe de détection repose sur le fait qu'un écoulement perturbe la distribution des températures au sein de l'ouvrage. La zone perturbée correspond à la zone d'écoulement et à son proche voisinage. On appellera anomalie thermique, la variation de température engendrée par un écoulement.

En l'absence de fuite, les transferts thermiques s'effectuent, en première approximation, uniquement par conduction. La température de l'ouvrage est fonction des sollicitations thermiques appliquées à ses frontières, en particulier la température de l'air et de l'eau. Cependant, l'influence de l'air ou de l'eau diminue très rapidement avec la profondeur. Généralement, à 10 m de profondeur, ces influences sont négligeables Johansson (1997). En présence de fuites, un nouveau mode de transport s'ajoute à la conduction : la convection. L'écoulement assure un transport d'énergie thermique de la retenue vers le barrage. Si l'écoulement est important, la température au voisinage du chemin d'écoulement est essentiellement imposée

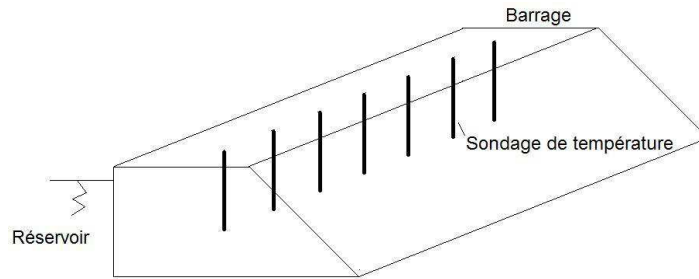


FIGURE 2.2.1: Schéma de réalisation de profils verticaux de température dans une section longitudinale de digue

par la température de la retenue. Une anomalie thermique de température, proche de celle de la retenue, indique la présence d'un écoulement relativement conséquent.

2.2.2 Dispositifs de mesures de température

2.2.2.1 Mesures ponctuelles de température

Sondages verticaux de température La mesure de température comme moyen de détection des fuites est utilisé avec succès en Allemagne depuis plus d'une vingtaine d'année. La compagnie GTC KAPPELMEYER en Allemagne est l'un des précurseurs de cette méthode (Kappelmeyer, 1957). Par reconstitution du champ thermique d'une section longitudinale de l'ouvrage, à un instant donné, un diagnostic sur la performance de l'étanchéité de l'ouvrage peut être émis. Pour obtenir une image du champ thermique, des tubages creux, de faible diamètre, sont foncés dans le sol, tout au long de la crête de l'ouvrage (Fig. 2.2.1). Des mesures de température sont réalisées à l'intérieur de ces tubages, à différentes hauteurs. Une image 2D du champ de température est obtenue par interpolation des différents profils verticaux de température. La résolution de l'image obtenue est liée à l'espacement entre les différents sondages. Il peut varier de 20 mètres pour des sols de forte perméabilité (sable, graviers) à 5 mètres pour des sols de faible perméabilité (argile, limon). Dans les sols de faible perméabilité, les écoulements sont confinés dans d'étroits chemins préférentiels, d'où le resserrement des mesures.

Les images 2D (Fig. 2.2.2) permettent la localisation spatiale des anomalies thermiques. Les anomalies thermiques repérables sur le profil présenté Fig. 2.2.2 correspondent à des apports d'eau plus chaude, en provenance de la retenue, au sein d'une digue plus froide.

Mesures de température dans les piézomètres Les piézomètres peuvent être utilisées pour obtenir des mesures de température du corps de l'ouvrage. A partir du niveau d'eau dans le piézomètre (niveau piézométrique) et jusqu'au fond de celui-ci, des mesures de température peuvent être faites à différentes hauteurs (Fig. 2.2.3). Pour une première mesure, un pas spatial de 1m est convenable. Il sera ensuite adapté suivant les mesures obtenues. L'hypothèse est faite que la température, au point de mesure, est représentative de la température de la

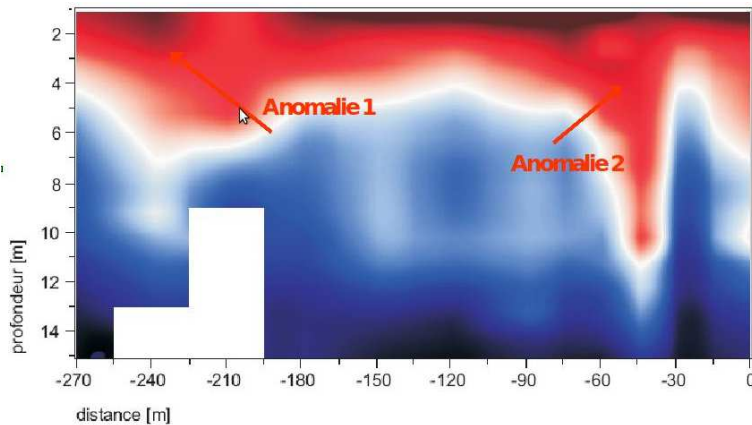


FIGURE 2.2.2: Cartographie 2D des températures le long d'une digue du Rhône (extrait d'une étude réalisée par GTC)

digue, à cette même profondeur. Lorsque le tube du piézomètre est large, le gradient de température, entre le bas et le haut, peut être à l'origine de courants de convection qui assurent un mélange à l'intérieur du piézomètre. Dans ce cas, l'équilibre thermique n'est plus vrai. Johansson (2005) recommande pour cette raison de réaliser les mesures dans des piézomètres de diamètre inférieur à 70 mm.

Les mesures sont très simples à réaliser. Une sonde de température est progressivement descendue dans le piézomètre. La sonde doit être descendue lentement pour éviter tout phénomène de mélange, altérant la distribution de température. De plus, toujours pour éviter les mélanges, il est préférable de faire les mesures de haut en bas. Une autre solution, plus adaptée à la surveillance de la distribution des profils verticaux de température, est l'utilisation d'une chaîne de capteurs de température, installée à demeure dans le piézomètre. Ce type d'instrumentation a été mis en place sur le site de Kembs (§6.1.3.2).

Détection d'une fuite horizontale Lorsque des désordres sont constatés sur un ouvrage, par inspection visuelle ou par l'auscultation, des mesures supplémentaires sont souvent nécessaires pour diagnostiquer l'origine des désordres. Pour affiner la compréhension du régime hydraulique, à l'intérieur d'une zone suspecte, des piézomètres peuvent être installés. En complément du suivi piézométrique, un suivi thermique peut être entrepris. Les profils de température apportent des informations supplémentaires, notamment sur la localisation de la zone d'écoulement.

Un tel suivi a été mis en place sur une digue du Rhône, où des relevés de profils verticaux ont été réalisés entre 1995 et 1996 (Fig. 2.2.4). Les profils de températures sont de formes bombées (carré orange). La courbure tend vers la température de la retenue (représenté en traits pointillés). L'amplitude des variations de températures, au lieu de diminuer avec la profondeur, augmente de nouveau entre les cotes 177,5 m et 174 m. Ce type de comportement témoigne de la présence d'un écoulement sous la limite des fondations. Une connexion thermique est établie entre le réservoir et les fondations et explique la hausse des amplitudes.

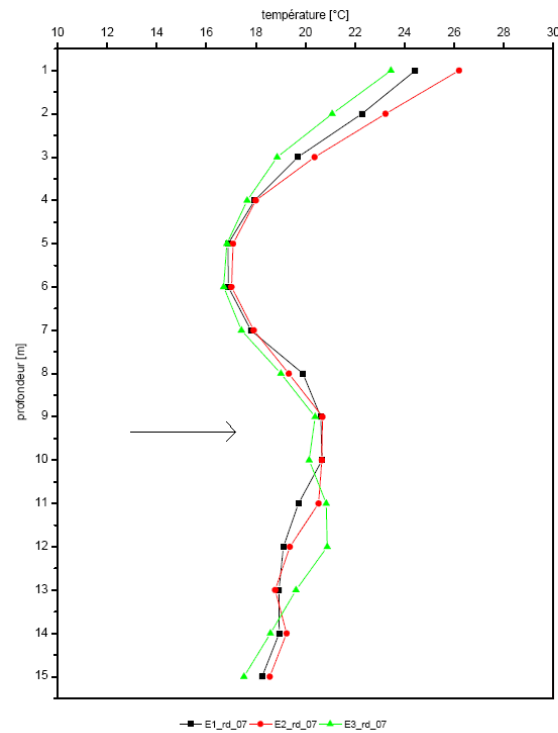


FIGURE 2.2.3: Profil vertical de température mesuré dans trois piézomètres d'un barrage sur le Rhône. La distorsion du profil de température indique la présence d'un écoulement.

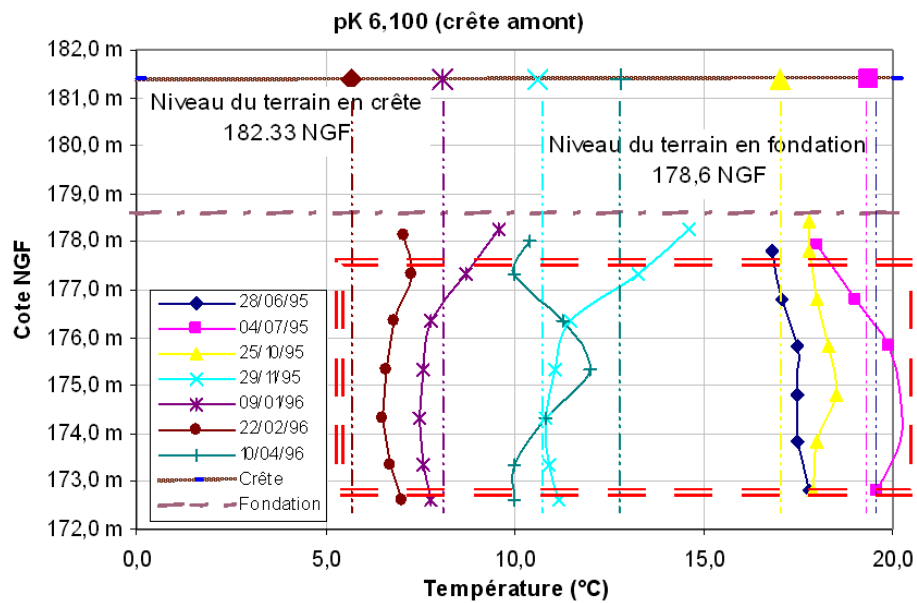


FIGURE 2.2.4: Mise en évidence d'un écoulement horizontal dans une digue par mesures de profils verticaux de température à différentes dates

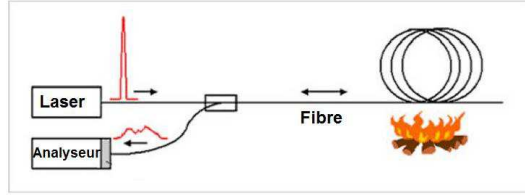


FIGURE 2.2.5: Schéma de principe du dispositif de mesure par fibre optique

2.2.2.2 Mesures de température distribuées par fibre optique

La fibre optique, utilisée comme capteur, offre la possibilité de mesurer continûment la température du milieu qui l'entoure.

Principe de mesures La mesure de température à l'aide de fibre optique est une technologie récente, apparue dans les années 80 (Dakin *et al.*, 1985). Cette technique a aujourd'hui plusieurs applications : détection d'incendies, surveillance des lignes électriques, surveillance de gazoducs etc...

Un dispositif de mesure de température par fibre optique se compose de trois principaux éléments (Fig. 2.2.5) : un laser, une fibre optique et un analyseur.

Le laser envoie un signal lumineux de fréquence fixe. Le signal se propage dans la fibre optique en subissant des pertes : une fraction du signal est diffusée par le matériau. Le signal rétro-diffusé retourne vers la source où se situe également l'analyseur. Le contenu fréquentiel du signal rétro-diffusé est une signature de l'état thermique de la fibre optique. L'analyseur permet d'extraire de ce signal l'information de température.

Pour localiser spatialement l'information thermique reçue, l'analyseur calcule le temps de vol entre l'impulsion laser et la réception du signal. Connaissant la vitesse de propagation de la lumière dans la fibre optique, l'abscisse x du point analysé peut être déterminée. Ainsi, à chaque acquisition, l'analyseur peut attribuer à chaque position x sur la fibre optique une valeur de température. Précisons que la résolution spatiale des mesures dépend des performances de l'appareil et en particulier de son laser : plus le pulse lumineux envoyé sera de courte durée et plus la résolution spatiale sera fine.

Revenons sur le principe physique utilisé pour mesurer la température. Trois types de diffusion sont à distinguer. La diffusion Rayleigh conserve la longueur d'onde de la lumière incidente, elle est dite élastique. Par contre les diffusions Brillouin et Raman produisent un décalage de fréquence autour de la fréquence initiale (Fig. 2.2.6). Ces diffusions sont dites inélastiques. Les pics de diffusion de fréquence, supérieurs à la fréquence du signal incident, sont appelés Anti-Stokes et ceux de fréquence inférieure Stokes.

Les pics Raman et Brillouin du côté Anti-Stokes varient suivant les conditions mécaniques et thermiques imposées à la fibre (Lanticq, 2009) : le pic Raman varie en amplitude suivant la température de la fibre et le pic Brillouin varie en fréquence suivant la température et la déformation de la fibre (Fig. 2.2.6). Ainsi la comparaison des pics Raman et Brillouin du côté

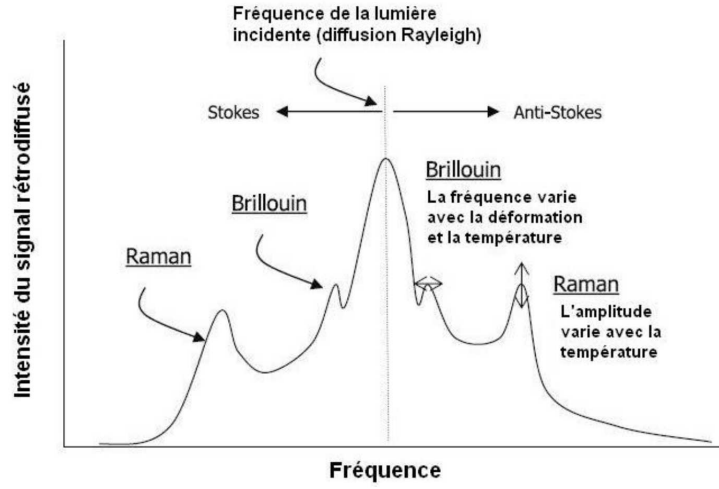


FIGURE 2.2.6: Intensité de la lumière rétro-diffusée en fonction de la fréquence. Pics Brillouin et Raman (extrait de Guidoux, 2007)

Stokes et Anti-Stokes permet d'extraire les informations de température et de déformation. Certains appareils exploitent l'effet Raman pour mesurer la température. Le rapport « r » de l'intensité du pic Anti-Stokes sur l'intensité du pic Stokes est directement lié à la température du milieu par la formule suivante (Dakin *et al.*, 1985) :

$$r = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right)^4 \exp \left(- \frac{h_p \Delta \nu}{kT} \right)$$

avec

λ_s et λ_a respectivement la longueur d'onde du pic Stokes et Anti-Stokes [m]

h_p la constante de Planck [Js],

c la vitesse de la lumière [ms^{-1}],

k la constante de Boltzman [JK^{-1}]

$\Delta \nu$ la différence entre la fréquence du pic Stokes (ou Anti-Stokes) par rapport à la fréquence incidente [s^{-1}], $\Delta \nu = c \left(\frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda} \right)$, λ est la longueur d'onde incidente.

T la température de la fibre au point considéré [K]

Performance de la mesure A ce jour, les appareils optoélectroniques, utilisés pour la mesure de températures, ont une précision de mesure de $0,01^\circ\text{C}$ (en conditions de laboratoire). Ils permettent d'obtenir des mesures réparties de température le long de la fibre optique, avec un pas spatial d'environ 1m (Tyler *et al.*, 2009).

La résolution de la mesure de température diminue lorsque d'une part la distance séparant l'analyseur du point étudié augmente et d'autre part la durée d'acquisition diminue (Fig. 2.2.7).

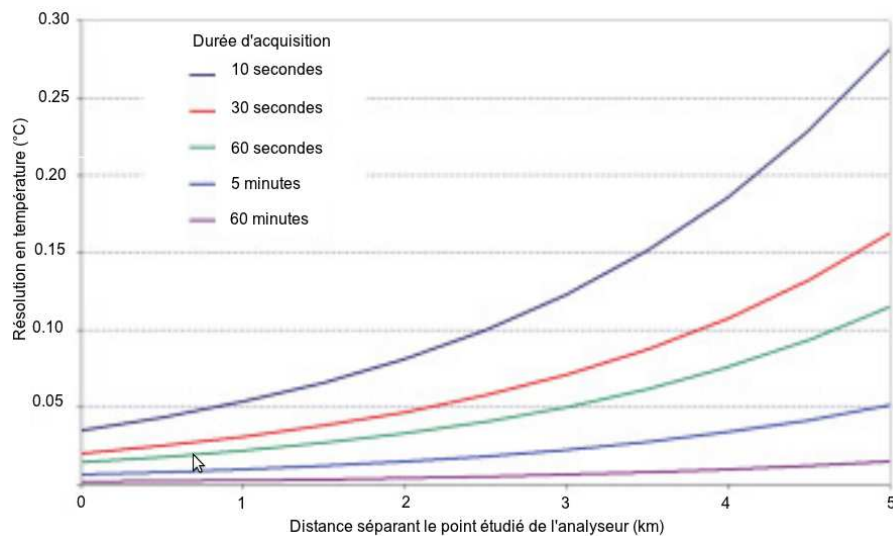


FIGURE 2.2.7: Évolution de la résolution de la mesure de température par fibre optique en fonction de la distance séparant le point étudié de l'analyseur et de la durée d'acquisition de chaque mesure (Sensornet, 2012)

Positionnement de la fibre optique La fibre optique peut être placée à différentes positions dans l'ouvrage. Le choix d'une position est la plupart du temps imposée par un ensemble de contraintes, certaines liées à la conception de l'ouvrage, d'autres au coût des travaux. Les solutions de placement envisageables sont les suivantes :

- solution 1 : dans le corps du remblai
- solution 2 : proche du réservoir (sous le parement amont)
- solution 3 : à faible profondeur sous le talus aval

La solution 1 est envisageable pour un ouvrage en construction. Ce choix sera préconisé uniquement dans le cas d'un ouvrage dont l'étanchéité est réalisée par un noyau peu perméable : la fibre sera placée à l'aval du noyau. Pour des ouvrages à masque d'étanchéité amont, la solution 2 offre le système de détection le plus dynamique. Dès l'apparition d'une fuite, le champ de température, au voisinage de la fibre, est perturbé. Cependant la mise en œuvre de cette solution nécessite un arrêt de l'exploitation du réservoir : la vidange est nécessaire. Elle ne sera mise en œuvre que si d'autres travaux de réfection sont envisagés. La solution 3 convient parfaitement aux ouvrages existants et quel que soit le type d'étanchéité. L'exploitation du canal n'est pas gênée par la pose de la fibre optique. De plus, la fibre étant placée à faible profondeur, les coûts des travaux sont limités.

Sources d'influence sur la température mesurée La température mesurée au niveau de la fibre optique résulte de différentes sources d'influence thermique (la température de l'air, la température de l'eau...) et dépend de la nature du sol. Ces différentes composantes doivent être identifiées et quantifiées. En effet, seule la composante relative à la température de l'eau nous renseigne sur la présence d'une fuite et son évolution. Suivant la position de

la fibre, les variables d'influences ne seront pas les mêmes. Les méthodes d'analyses utilisées vont dépendre de la position choisie.

2.2.3 Méthodes de détection et quantification existantes

2.2.3.1 Méthode active

Dans certains cas, l'écart entre la température du sol et la température de la fuite est trop faible pour être détectable. Les méthodes passives, qui se basent sur les mesures de la température naturelle du sol, s'avèrent inefficaces pour la détection de fuites.

Il est possible de créer artificiellement un écart de température en chauffant la fibre optique. La donnée utile n'est plus directement la température du milieu mais plutôt la réponse thermique du milieu à un échelon de température. Cette réponse thermique est caractérisée par la différence de température de la fibre dT , avant la période de chauffe et juste après la période de chauffe. Les méthodes se basant sur ce type de mesures sont qualifiées de méthodes actives, par opposition aux méthodes utilisant les données de température du milieu non perturbé, et dénommées méthodes passives.

La variation de température dT est fonction, entre autres, du degré de saturation du sol et des conditions hydrauliques du milieu. Un sol saturé présente une inertie thermique plus importante qu'un sol sec et par conséquent s'échauffe moins vite que ce dernier. De même, un sol traversé par un écoulement aura un dT plus faible. La chaleur dégagée par le câble est transportée par l'écoulement. Plus la vitesse de fuite est importante, plus le dT sera faible.

Les résultats expérimentaux de Perzmaier (2007) mettent en évidence ces relations (Fig. 2.2.9). L'analyse du dT permet de mettre en évidence les zones de plus forte teneur en eau ou les zones d'écoulement. Les fuites sont donc potentiellement détectables par cette méthode qualifiée de Heat Pulse Method. L'entreprise GTC utilise, sur plusieurs ouvrages, cette méthode.

Les travaux de Perzmaier (2007) ont permis de développer une méthode de quantification basée sur la Heat Pulse Method.

Perzmaier a développé un dispositif expérimental (Fig.2.2.8) permettant de tester la réponse thermique de différents types de sols, soumis à différentes vitesses de fuites. Le sol testé est disposé dans un bassin clos. La fibre optique traverse longitudinalement le bassin. Le sol est soumis à une charge d'eau provenant d'un bassin supérieur. Le débit de fuite à travers le sol est contrôlé par une vanne, disposée en sortie du tuyau de drainage du bassin.

Pour chaque type de sol testé, la courbe (dT vs v_f) a été tracée. Cette courbe est relativement peu sensible au type de sol. La courbe (dT vs v_f) peut donc être utilisée comme courbe de référence.

La méthode exploite cette courbe pour quantifier les fuites détectées. Sa méthodologie est la suivante :

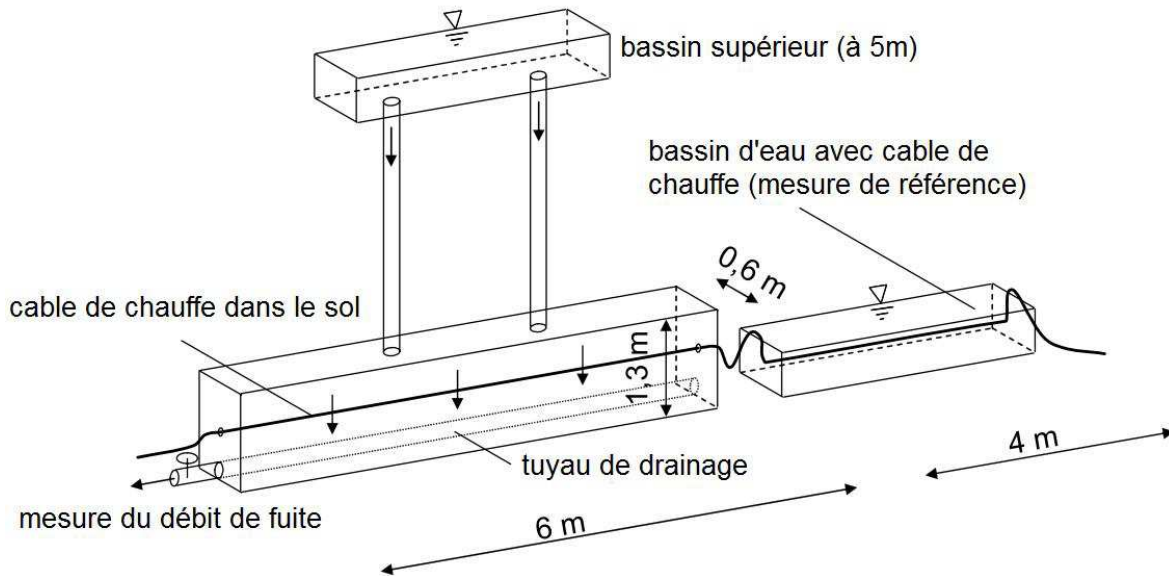
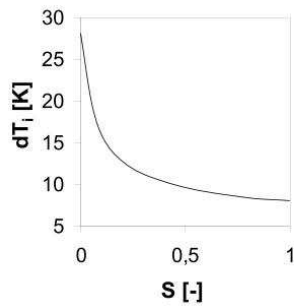
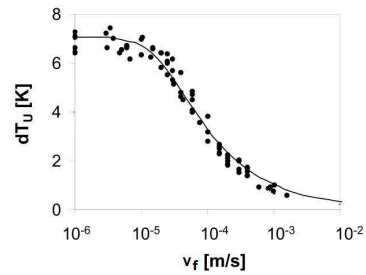


FIGURE 2.2.8: dispositif expérimental utilisé pour développer la méthode active



(a) Gradient thermique et degré de saturation



(b) Vitesse de fuite et degré de saturation

FIGURE 2.2.9: Influence du degré de saturation et de la vitesse de fuite sur dT (extraits de Perzmaier (2007)). Résultats obtenus pour un sable et une puissance de chauffe de 12 W/m .

- le dT est mesuré sur site. Une mesure est faite avant la période de chauffe. Le câble contenant la fibre optique est ensuite chauffé pendant environ une heure à une puissance de l'ordre de 12 Wm^{-1} puis la deuxième mesure est effectuée. dT est la différence des deux mesures.
- la courbe de référence (dT vs v_f) est utilisée comme abaque pour estimer la vitesse de fuite v_f

La méthode permet d'estimer des vitesses de fuite allant de 10^{-6} ms^{-1} à 10^{-3} ms^{-1} . Or les problèmes d'érosion interne atteignent un niveau critique pour ces gammes de vitesse. La méthode apparaît donc appropriée pour détecter un phénomène d'érosion interne.

2.2.3.2 Méthodes passives

Méthodes du temps retard et des amplitudes Ces méthodes se basent sur l'analyse des variations annuelles des signaux de température mesurés Johansson (1997). L'amplitude et la phase des signaux de température de l'eau et du point de mesure dans l'ouvrage sont utilisées pour quantifier l'intensité des écoulements.

La température dans l'ouvrage dépend des sources d'influence thermique externes, telles que la température de l'air, le rayonnement ou la température du réservoir. Ces influences varient de manière saisonnière et se propagent à l'intérieur de l'ouvrage. Seule la composante saisonnière de ces signaux est prise en compte dans les méthodes de Johansson. Elle est modélisée par une fonction sinusoïdale. En l'absence de fuite, le transport thermique assurant la propagation des signaux extérieurs est la conduction. Les ondes thermiques sont très rapidement amorties en se propageant dans le sol. Johansson estime que, dans un ouvrage sans fuite, les influences de la température de l'air sont inférieures à 1°C à partir de 10 m. Cependant, si une fuite traverse l'ouvrage, le mode de transport de l'énergie thermique change : une partie de cette énergie est transportée par l'écoulement (convection). La propagation du signal de température de l'eau est améliorée. Si la vitesse est suffisante, les échanges par convection deviennent dominants et la température, dans la zone de fuite, dépend principalement de la température de l'eau. Les méthodes de Johansson ne prennent en compte que l'influence de la température de l'eau. De plus, les mesures de température sont supposées être faites dans une zone soumise à un écoulement. Autrement dit, le cadre d'application de ces méthodes se restreint à l'analyse des mesures de température faites :

- dans une zone non influencée par les températures de l'air
- dans une zone traversée par un écoulement

L'amortissement et le retard entre le signal de température d'eau et celui du point de mesure dans l'ouvrage dépendent de la vitesse de fuite. Johansson propose deux méthodes pour estimer les débits de fuite : l'une est basée sur l'analyse des temps retards, la méthode des temps retard, l'autre sur l'analyse de l'amortissement du signal, la méthode des amplitudes.

Méthode du temps retard La fuite est modélisée par un écoulement unidimensionnel à travers une couche de sol. Il est supposé que les transferts thermiques, à travers cette couche de sol, se font uniquement par convection. De ce fait, le déphasage Δt entre le signal de température de l'eau et celui du point de mesure dans l'ouvrage correspond au temps mis par l'onde thermique pour parcourir la distance x , séparant le réservoir du point de mesure. La vitesse de diffusion de l'onde thermique v_T peut être déterminée. Cette vitesse est liée à la vitesse de Darcy v_D considérée comme la vitesse de fuite.

$$v_T = \frac{x}{\Delta t} [\text{ms}^{-1}] \quad (2.2.1)$$

A partir de v_T , on obtient la vitesse de fuite par la relation suivante, valable en unidimensionnel :

$$v_D = v_T \frac{(\rho C_p)_s}{(\rho C_p)_w} = c.v_{th} [\text{ms}^{-1}] \quad (2.2.2)$$

$(\rho C_p)_s [\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}]$, est la capacité calorifique volumique du sol saturé et $(\rho C_p)_w$ celle de l'eau.

Méthode des amplitudes Les écoulements traversant un ouvrage hydraulique en terre se font le long de chemins préférentiels. Dans ces zones, la perméabilité est localement plus élevée et les influences thermiques, en provenance du réservoir, s'y propagent d'autant plus facilement du fait des échanges par convection. La méthode des amplitudes se base sur un modèle simple, reproduisant les échanges thermo-hydrauliques, à l'intérieur de ces zones de fuite de forte perméabilité. Un modèle tri-couche est considéré. La fuite est supposée de vitesse constante, horizontale et de hauteur connue : elle constitue la couche centrale. Les échanges thermiques dans cette zone se font par convection et conduction. La sollicitation thermique du réservoir, de forme sinusoïdale, se propage dans cette zone. Des échanges par conduction sont considérés avec les deux couches qui entourent la zone de fuite. Notons que dans ces zones, les gradients de température horizontaux sont négligés. Une formulation mathématique et une méthode de résolution analytique du champ de température à l'intérieur de la zone centrale sont proposées dans le document de Johansson et Hellström (2001). L'amplitude du signal de température dans la zone centrale, $T^{max} - T^{min}$, dépend de plusieurs paramètres :

- l'amplitude annuelle des variations de température du réservoir $T_w^{max} - T_w^{min}$
- l'abscisse du point considéré x [m]
- la hauteur de la couche d'écoulement H [m]
- les propriétés thermiques du sol : la diffusivité $a \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ qui suppose la connaissance de la conductivité thermique et la capacité calorifique volumique du sol
- la vitesse de propagation du front thermique v_T liée à la vitesse d'écoulement par Eq. 2.2.2

Ces paramètres ont été regroupés en variables adimensionnelles par les auteurs :

- l'une regroupant les amplitudes :

$$T' = \frac{T^{max} - T^{min}}{T_w^{max} - T_w^{min}}$$

- l'autre regroupant des paramètres géométriques, thermiques et hydrauliques :

$$x' = \frac{ax}{v_T H^2}$$

Les solutions du problème thermo-hydraulique, présenté ci-dessus, ont été représentées sous forme d'abaques tracés à partir des variables adimensionnelles x' et T' (Fig. 2.2.10). Rappelons que le paramètre inconnu est la vitesse de propagation du front thermique v_T , paramètre

compris dans x' . Estimant H et connaissant T' d'après les mesures de température, x' est estimé d'après l'abaque Fig. 2.2.10. La vitesse de propagation peut alors être connue, étant donnée l'expression de x' . De nouveau, on suppose que les paramètres a , H et x sont connus.

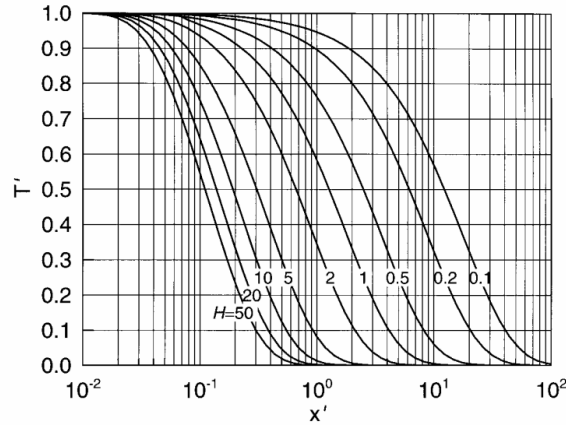


FIGURE 2.2.10: Variation d'amplitude normalisée et débit de fuite, résultats analytiques (extrait de Johansson (1997))

Ce modèle de quantification a été intégré dans un logiciel commercialisé appelé DamTemp que nous utiliserons dans cette étude (§6.3.1.2).

Applicabilité des méthodes du temps retard et des amplitudes L'application de ces méthodes est restreinte aux mesures effectuées dans une zone soumise à un écoulement et non sensible à la température de l'air. Elles sont particulièrement adaptées à l'analyse des mesures faites dans des piézomètres : les profondeurs atteintes sont grandes et garantissent une non-sensibilité à la température de l'air.

Méthode du gradient Cette méthode a été développée par Porras Velásquez (2007). Elle se base sur les résultats de simulations numériques dont le but est d'étudier :

- le comportement thermique d'une couche de sol,
- la propagation de fluctuations thermiques,
- l'influence des fluctuations de haute fréquence et basse fréquence sur le champ de température d'une digue traversée par des fuites.

A partir des résultats obtenus, des lois paramétriques simples ont été établies. Ces lois permettent de construire une méthode de détection et de quantification.

Méthode de détection La diffusion des variations saisonnières de température dans un sol non traversé par un écoulement a été simulée : les échanges se font entièrement par conduction. Les variations saisonnières de température sont modélisées par une fonction sinusoïdale. Le problème étudié est la diffusion d'une onde sinusoïdale dans un domaine semi-infini à surface libre horizontale. Les résultats obtenus ont permis de tracer, pour différentes

périodes de l'année, des profils verticaux de température. Ces profils dépendent essentiellement des caractéristiques thermiques du sol, regroupées dans le terme de diffusivité a [m^2s^{-1}]. Par normalisation des grandeurs z et T , respectivement profondeur et température du point étudié, un ensemble de profils indépendants des paramètres thermiques du sol a été tracé (Fig.2.2.11). Les grandeurs normalisées sont :

$$T^* = 2 \cdot \frac{T - T_{mean}}{T_{max} - T_{min}}$$

et

$$z^* = \frac{z}{z_{2.5\%}}$$

T_{mean} , T_{max} et T_{min} représentent respectivement la température moyenne, maximale et minimale des températures mesurées sur une année. $z_{2.5\%}$ est la profondeur à partir de laquelle les amplitudes de température ΔT représentent 2,5% des amplitudes de température à la surface $\Delta T_{air} = T_{air}^{max} - T_{air}^{min}$. Cette profondeur de référence est appelée point d'extinction. Porras Velásquez (2007) a établi que :

$$z_{2.5\%} = 12.25a^{0.47} \quad (2.2.3)$$

Finalement à partir de Eq.2.2.3 et des profils normalisés de température Fig.2.2.11, un intervalle dans lequel la température doit varier en l'absence de fuite peut être défini. Si la température mesurée se situe en-dehors de cet intervalle, alors des investigations plus approfondies doivent être menées pour identifier l'anomalie constatée. La présence d'une fuite est probable mais ce n'est qu'une éventualité. Pour appliquer cette méthode les données nécessaires sont

- les mesures de température sur une année
- la profondeur des mesures z
- les propriétés thermiques du terrain : la capacité calorifique volumique et la conductivité thermique, nécessaires pour calculer la diffusivité a .

Enfin, il ne faut pas oublier que les profils normaux ont été construits en supposant le sol homogène.

Méthode de quantification A travers des simulations numériques, Porras Velásquez (2007) montre qu'il est possible de quantifier un écoulement, en s'intéressant à la propagation des fluctuations de température de courte période (quelques jours). Le terme fluctuation désigne une variation de température par rapport à une tendance. La propagation d'une fluctuation dans l'ouvrage est fonction de la vitesse d'écoulement. Une fluctuation se propage d'autant plus loin dans l'ouvrage que son amplitude et sa période sont importantes. Porras Velásquez (2007) donne un ensemble de critères permettant de définir l'amplitude et la fréquence des fluctuations qui devraient être visibles au point d'observation pour une vitesse

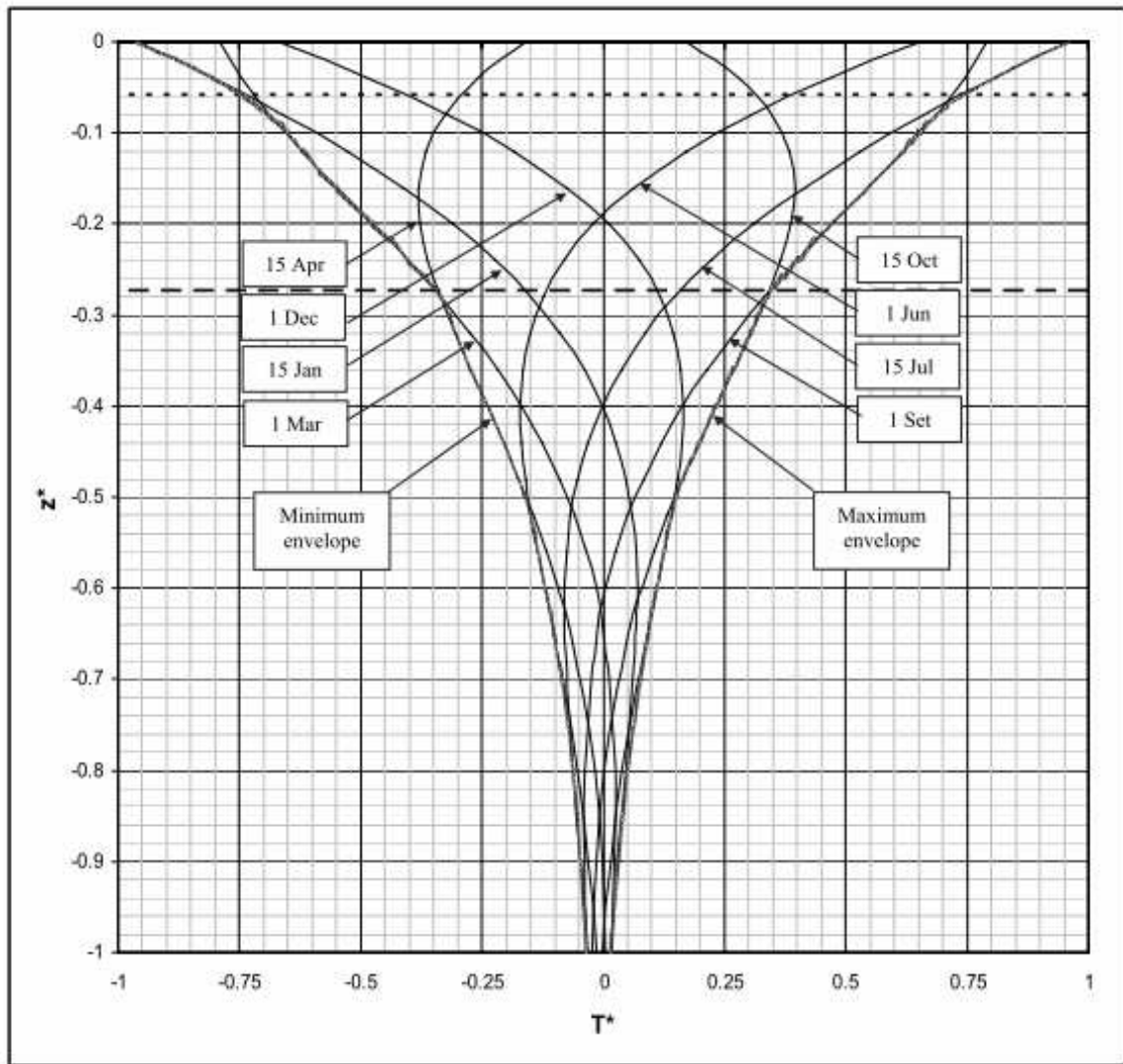


FIGURE 2.2.11: Profils de température verticaux dans le sol à différentes périodes de l'année (extrait de Porras Velásquez, 2007)

d'écoulement.

La méthode d'estimation de la vitesse d'écoulement (vitesse de Darcy) est similaire à la méthode du temps de retard de Johansson (1997) (§2.2.3.2). Le principe repose sur l'évaluation du déphasage Δt , existant entre la fluctuation de température dans le réservoir et au point d'observation dans l'ouvrage (Fig. 2.2.12). Δt donne accès à la vitesse de propagation de l'onde thermique v_T qui est proportionnelle à la vitesse de darcy v_D i.e. la vitesse de fuite. Tout comme la méthode de Johansson, cette approche n'est applicable que pour des zones non sensibles à la température de l'air.

Méthode implusionnelle Cette méthode, développée par Radzicki (2009) consiste à identifier, au signal de température mesuré à l'intérieur de l'ouvrage, des fonctions paramétriques, reproduisant le comportement thermique de l'ouvrage. L'analyse des paramètres identifiés est

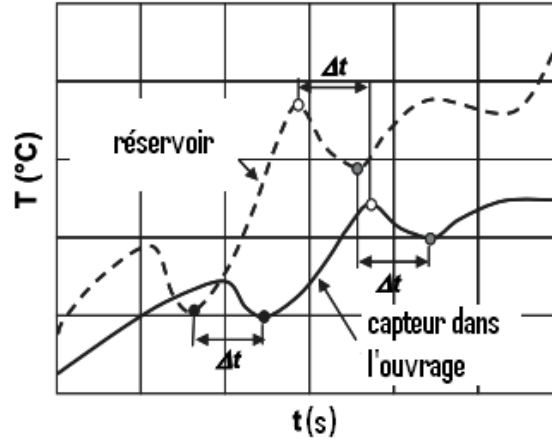


FIGURE 2.2.12: Comparaison de la température dans le réservoir et au point d'observation dans l'ouvrage situé dans la zone de fuite (extrait de Porras Velásquez (2007))

utilisée pour détecter les fuites.

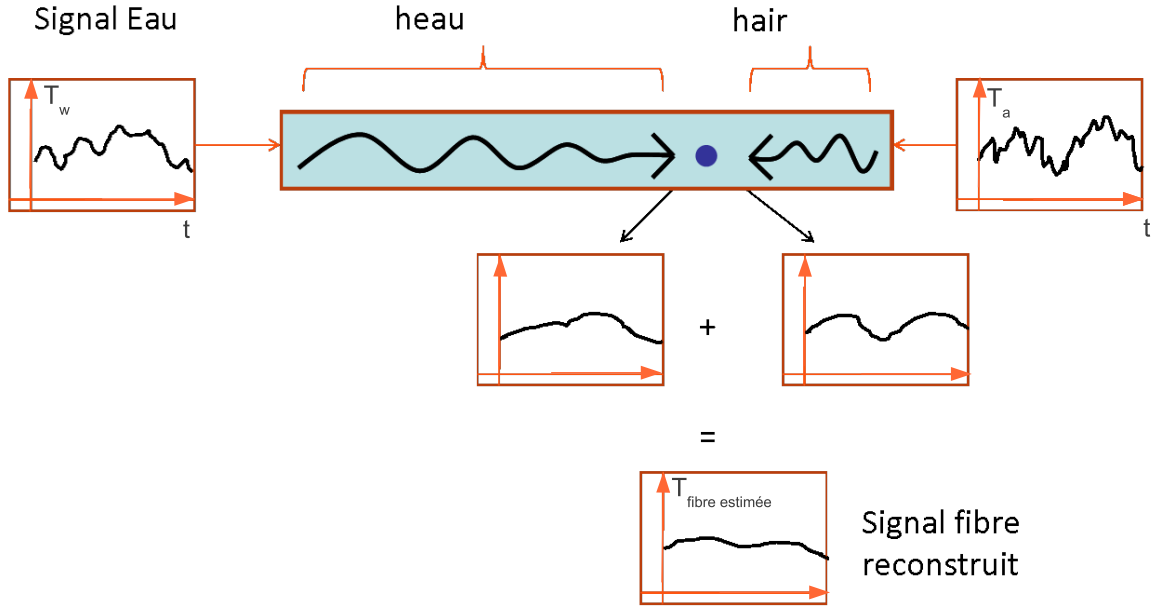
Modélisation du problème thermo-hydraulique Les fonctions paramétriques utilisées proviennent d'une modélisation physique simple. Le problème de transfert d'eau et de chaleur dans un ouvrage traversé par une fuite est réduit à un problème thermo-hydraulique unidimensionnel dans une couche de sol. Les fuites sont représentées par un écoulement à vitesse constante. Et les sollicitations thermiques de l'ouvrage sont réduites à l'application de signaux de température aux deux extrémités de la couche de sol : la température de l'eau du réservoir T_w est imposée du côté gauche, appelé côté amont et celle de l'air est imposée, du côté droit, appelé côté aval. Des solutions analytiques au problème d'advection-diffusion en une dimension existent pour les conditions aux limites thermiques suivantes : d'un côté la température est prise nulle et de l'autre, un pulse de température est imposé (Radzicki (2009)). Ces solutions constituent les fonctions de transfert de la couche de sol : celle relative à la sollicitation amont est notée h_{eau} et celle relative à la sollicitation aval h_{air} . Elles sont ensuite utilisées pour calculer la réponse thermique à tout type de sollicitations.

Radzicki utilise une fonction exponentielle décroissante dépendant de deux paramètres, notés $\alpha[-]$ et $\eta[s]$ pour approcher les fonctions de transfert. η est identifié comme un paramètre représentant le retard, entre la sollicitation et la réponse, et α comme un paramètre représentant l'amortissement, entre la sollicitation et la réponse. La réponse à une sollicitation thermique bilatérale, i.e. côté amont et aval, est calculée en sommant la réponse à chacune des sollicitations appliquées séparément. La température en un point spatial de l'ouvrage noté x et à un instant t s'écrit :

$$T(x, t) = f_{\alpha_{air}, \eta_{air}}(T_{air}(t), h_{air}) + g_{\alpha_{eau}, \eta_{eau}}(T_{eau}(t), h_{eau})$$

avec

f et g les fonctions de transferts relatives respectivement au côté aval et amont,



$$T_{fibre\ estimée}(t) = f(T_{air}(t), h_{air}) + g(T_{eau}(t), h_{eau})$$

FIGURE 2.2.13: Schéma du principe de fonctionnement du modèle impulsionnel

T_{air} et T_{eau} les températures de l'air et de l'eau,

$(\alpha, \eta)_i$, $i = \{air, eau\}$ les paramètres amortissement et retard des fonctions de transferts,

La formulation de la température modélisée dépend alors de quatre paramètres. Radzicki simplifie l'application de son modèle lorsque le capteur de température est placée dans une région de l'ouvrage essentiellement influencée, soit par l'eau, soit par l'air. Dans une région sous influence majoritaire

- de la température de l'air :

$$T(x, t) = f_{\alpha_{air}, \eta_{air}}(T_{air}(t), h_{air}) \quad (2.2.4)$$

- de la température de l'eau :

$$T(x, t) = g_{\alpha_{eau}, \eta_{eau}}(T_{eau}(t), h_{eau}) \quad (2.2.5)$$

Dans chacune de ces régions, le modèle ne compte plus alors que deux paramètres.

Identification et détection de fuites Les paramètres des fonctions de transferts sont calculés par identification. L'identification consiste à trouver, à l'aide de méthode d'optimisation, le couple de paramètre qui minimise l'écart entre la température mesurée et celle modélisée par la somme de fonctions de transfert.

Dans le cas où l'influence du réservoir est limitée, la température est alors modélisée par une fonction ne dépendant que de l'air et paramétrée par le couple α_{air} et η_{air} (Eq.

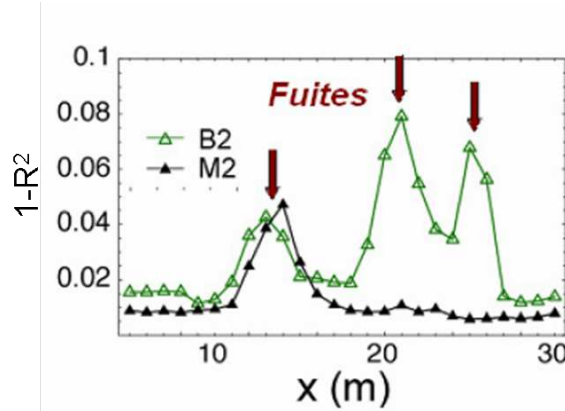


FIGURE 2.2.14: Détection de fuites à l'aide de la méthode impulsionnelle, pour une fibre optique située à mi-hauteur du talus aval (M2) et une autre située au pied du talus aval (B2) (résultats extraits de Radzicki (2009))

2.2.4). La température calculée, à partir du modèle, peut être comparée à la température mesurée. Le coefficient de détermination, noté R^2 , est utilisé pour caractériser la fiabilité de la modélisation. Quand il n'y a pas de fuite, R^2 est proche de 1 : la température de l'air est la seule influence. En revanche, en présence de fuites, la valeur de R^2 tend vers 0 : le modèle n'est pas capable de prendre en compte l'influence de l'eau, sa performance de modélisation diminue. Le paramètre R^2 peut donc être utilisé pour détecter la présence de fuites. Cette approche a été utilisée pour détecter les fuites contrôlées du bassin d'Aix en Provence (Chap. 5). Une fibre placée à mi-hauteur du talus aval et notée M2 est traversée par une fuite. Une autre fibre disposée en pied de talus (B2) est traversée par trois fuites. Le tracé du coefficient R^2 calculé pour chaque point de mesure, le long de la fibre optique, fait apparaître les zones de fuites (Fig. 2.2.14).

Pour résumer, la température en un point de la couche de sol est modélisée par la sommation d'une fonction représentant l'influence thermique du réservoir et l'autre celle de l'air. Chacune de ces deux fonctions est paramétrée par le couple (α, η) qui détermine la part d'influence du signal source, en modulant son amplitude et réglant sa phase. Les paramètres sont déterminés par identification.

Méthodes statistiques Khan (2009) a développé des méthodes statistiques pour la détection de fuite à partir des données de température mesurées le long d'une fibre optique. Une fibre optique peut être vue comme un ensemble de capteurs, répartis le long de la fibre. Le nombre de capteurs N_x dépend de la résolution spatiale de l'appareil. Une acquisition à un instant donné constitue un profil spatial de température le long de la fibre. Dans un but de surveillance, des acquisitions sont réalisées périodiquement dans le temps : on note N_t le nombre d'acquisition réalisées. L'ensemble des données mesurées constitue une matrice \mathbf{Y} dont l'une des dimensions est le nombre de capteurs le long de la fibre N_x (dimension spatiale) et l'autre est le nombre d'acquisitions réalisées dans le temps N_t (dimension temporelle). Les

températures mesurées dans l'ouvrage, réparties dans le temps et dans l'espace, dépendent d'un ensemble de facteurs. Khan cite notamment :

- les variations saisonnières et journalières de température de l'air ou d'ensoleillement,
- les précipitations,
- les structures existantes dans le terrain (drains, regards, canalisations,...),
- les hétérogénéités du terrain,
- la présence de fuites.

A partir de cette constatation, Khan propose de voir \mathbf{Y} comme la résultante du mélange de différentes sources, chacune d'entre elles étant associées aux facteurs décrits ci-dessus. Formellement, cette décomposition s'écrit :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{M}\mathbf{F}$$

avec

\mathbf{M} matrice de mélange,

\mathbf{F} matrice contenant les différentes sources.

Précisons que parmi les facteurs, ou sources, évoqués ci-dessus, seul celui relatif à la présence de fuites nous intéresse. Khan propose deux méthodes pour décomposer la matrice de données en différentes sources et mettre en évidence la source relative aux fuites. La première méthode, appelée analyse journalière, exploite la décomposition en valeurs singulières (Khan *et al.*, 2010). La seconde est basée sur la technique d'analyse en composantes indépendantes ACI (Khan *et al.*, 2008). Les algorithmes de l'une ou l'autre des méthodes ne seront pas présentés. Seule la méthodologie d'application de ces méthodes sera développée.

Méthode de détection journalière Ce modèle a pour but de détecter des zones singulières de l'ouvrage, telles que des structures existantes, des fuites ou des singularités du terrain. L'application de ce modèle impose deux hypothèses :

- le comportement thermique de ces zones évolue sur une journée,
- le linéaire étudié ne doit contenir qu'un nombre très limité de zones sans fuite (zones non traversées par un écoulement de fuite).

De la matrice de données sont extraites les acquisitions correspondant à une journée. Pour que la méthode d'analyse journalière soit applicable, Khan *et al.* (2010) recommandent d'utiliser au moins 12 acquisitions pour une journée. Ces données extraites forment une matrice notée \mathbf{Y} . La décomposition en valeurs singulières (« Singular Value Decomposition », SVD) permet de séparer les différentes sources et de les classer par ordre d'importance (Fig. 2.2.15). Mathématiquement, la SVD conduit à la décomposition de la matrice de départ \mathbf{Y} en produit de trois matrices :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \tag{2.2.6}$$

\mathbf{Y} est la matrice de données de température de dimension $N_T \times N_x$. N_T est le nombre d'acquisitions faites en une journée et N_x le nombre de capteurs le long de la fibre.

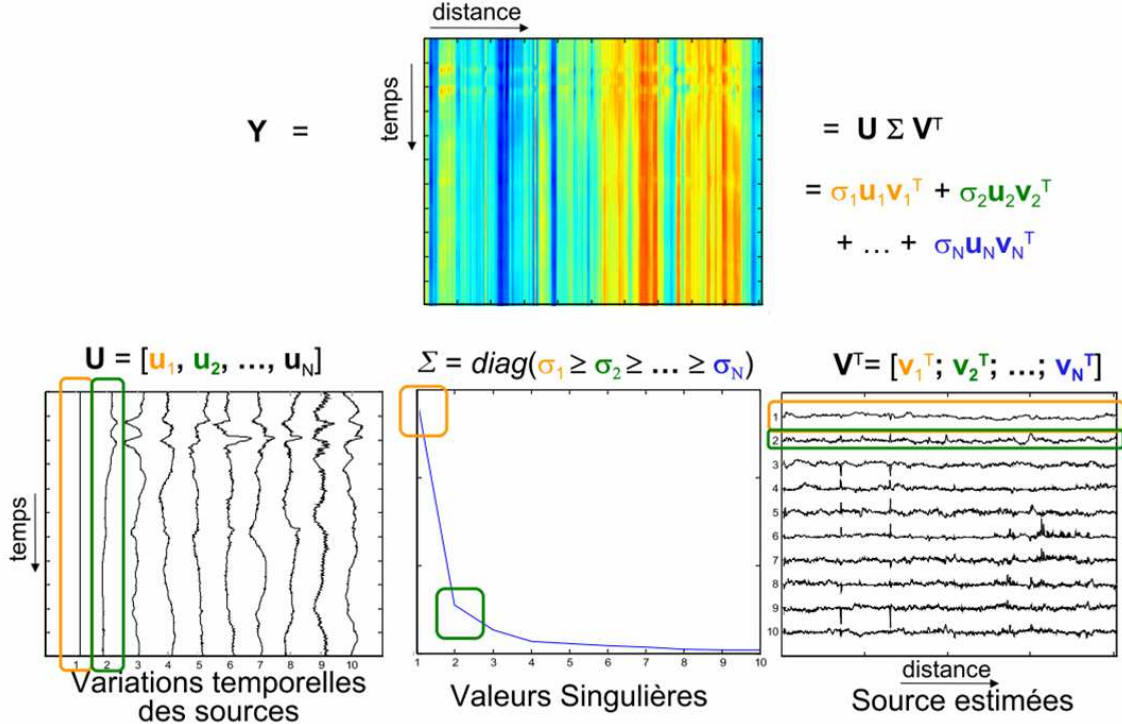


FIGURE 2.2.15: Principe de décomposition par SVD (extrait de Khan (2009))

Σ est une matrice diagonale de même dimension que $N_T \times N_x$ qui contient les valeurs singulières $(\sigma_i)_{i=1, N_x}$ de la matrice \mathbf{Y} . Les valeurs singulières sont classées par ordre décroissant.

\mathbf{U} et \mathbf{V} sont des matrices carrées respectivement de dimension $N_T \times N_T$ et $N_x \times N_x$

On notera $(\mathbf{u}_i)_{i=1, N_T}$ les différents vecteurs de \mathbf{U} et $(\mathbf{v}_i^T)_{i=1, N_x}$ ceux de \mathbf{V}^T . Khan interprète les matrices \mathbf{U} et \mathbf{V} de la manière suivante : la matrice \mathbf{V}^T contient l'ensemble des sources estimées et la matrice \mathbf{U} contient les variations temporelles des sources. La matrice de données \mathbf{Y} est la somme des différents produits $\mathbf{u}_i \sigma_i \mathbf{v}_i^T$. Les valeurs singulières σ_i pondèrent l'importance accordée à chaque source. L'utilisation de l'ensemble des sources permet de reconstruire la matrice de température initiale selon Eq. 2.2.6. Mais une bonne approximation de \mathbf{Y} peut être obtenue en ne conservant que les sources de plus grande importance. Pour la détection de fuites, Khan recommande de ne conserver que la première source. Cette source rassemble l'information partagée par l'ensemble des capteurs. Or par hypothèse, la majorité des capteurs n'est pas affectée par une fuite. L'information relative à des événements singuliers, telle que la présence d'une fuite, est donc absente de cette source. La matrice de température reconstruite, $\mathbf{u}_1 \sigma_1 \mathbf{v}_1^T$, permet d'obtenir, pour chaque capteur de la fibre, un signal de température de référence. Ce signal de référence peut être comparé au signal mesuré (Fig. 2.2.16). Une mesure, basée sur la somme du carré des écarts, fournit une indication chiffrée de l'écart. Cette mesure, répétée pour l'ensemble des capteurs, permet de tracer un profil des écarts en fonction de la distance. Pour les points situés en-dehors des zones de fuite, l'écart

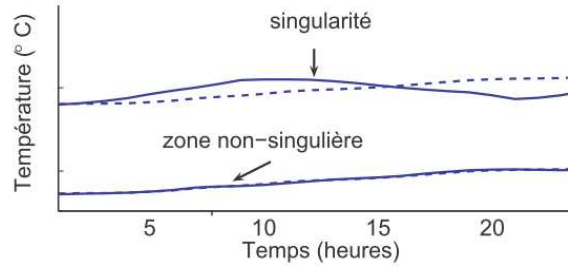


FIGURE 2.2.16: Comparaison du signal de référence (traits pointillés) et du signal mesuré (traits continus) pour un capteur situé dans une zone singulière et un autre dans une zone non singulière

mesuré entre les deux signaux sera faible. En revanche, il augmentera pour les points situés en zone de fuite. On appellera anomalies les points correspondant à des écarts importants.

L'analyse présentée peut être ensuite répétée pour chaque jour de mesures. On obtient alors une matrice contenant l'ensemble des profils des écarts pour les différents jours de mesures. La détection des anomalies et donc des fuites peut se faire directement à partir de la représentation graphique de cette matrice. Plus simplement, une courbe, représentant la projection spatiale de la matrice des écarts, peut être utilisée pour la détection. Précisons que la méthode de Khan inclut d'autres outils, tels que des critères de détection de fausses alarmes qui ne seront pas présentés ici.

Méthodes de séparation de source par Analyse en Composante Indépendante (ACI) La SVD est une méthode parfois insuffisante pour faire apparaître les fuites dans les différentes sources estimées ou les séparer d'autres phénomènes. En complément, Khan propose d'utiliser une autre méthode de séparation de sources appelée ACI qui est appliquée à la suite de la SVD. La méthodologie de détection de fuites à partir de ces méthodes est présentée ci-après (Fig. 2.2.17).

La température dans le sol dépend d'un ensemble de facteurs. Parmi ces facteurs, Khan distingue ceux liés aux propriétés du sol (nature et structure du sol) et à son exposition au soleil. Khan appelle réponse du sol, la part du signal de température résultant de ces facteurs. Cette réponse est une composante principale du signal : elle détermine la forme du signal de température. Du fait de sa part prépondérante, elle masque les informations liées à d'autres facteurs telle que la présence d'une fuite. L'application de la SVD vise à ôter du signal la partie correspondant à la réponse du sol. Les différentes sources estimées par la SVD sont contenues dans la matrice \mathbf{V}^T présentée précédemment (§2.2.3.2). La première, associée à la valeur singulière la plus importante, correspond à la réponse du sol. La matrice de température associée à cette source, $\mathbf{u}_1\sigma_1\mathbf{v}_1^T$, est ôtée à la matrice de température \mathbf{Y} . Pour l'analyse par ACI, seuls un certain nombre p de sources \mathbf{v}_i restantes, appelées par la suite sources SVD, sont utilisées. Le nombre de sources SVD utilisées pour la décomposition est un choix de l'utilisateur. Dans les différentes analyses de Khan (2009), un nombre de sources

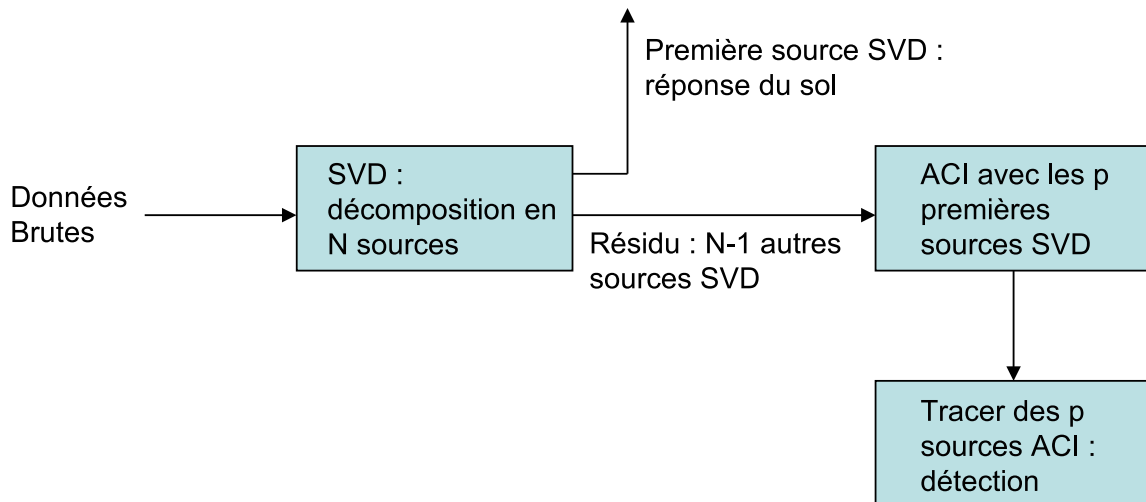


FIGURE 2.2.17: Méthodologie de la détection de fuites à partir de méthodes de séparation de sources basées sur la SVD et l'ACI

compris entre 2 et 7 a été choisi. Après traitement par ACI, une décomposition en p nouvelles sources est obtenue. Le tracé de ces différentes sources permet la détection des fuites.

Cette méthode de détection utilise successivement deux techniques de séparation de sources. La première, la SVD, est utilisée pour ôter du signal la réponse du sol. La seconde, l'ACI, permet d'extraire du signal, traité par SVD, différentes sources à partir desquelles peuvent être identifiées les fuites. Cette méthode peut être appliquée sur un historique de données de plusieurs mois ou années. Si l'on souhaite mettre en évidence la présence de fuite limitées dans le temps, la méthode doit être appliquée sur une fenêtre de temps limitée (Khan utilise trois semaines) que l'on fait glisser sur l'ensemble de la période de mesures. De cette manière, l'information sur les fuites, brèves dans le temps et dans l'espace, ne sera pas noyée dans l'ensemble des données.

Conclusion

Différentes méthodes de détection des fuites ont été présentées. Elles ont été regroupées en deux catégories, les méthodes géophysiques et les méthodes thermométriques. Pour un diagnostic efficace, l'application de ces différentes méthodes, complémentaires entre elles, est recommandé.

Les premières sont fréquemment utilisées pour le diagnostic de zones problématiques sur les ouvrages. Elles comprennent les méthodes de mesure de la résistivité électrique, dont le panneau électrique est la variante la plus utilisée, les méthodes électromagnétiques basse fréquence et les méthodes de potentiel spontané. En couplant une méthode de résistivité et de potentiel spontané, Boleve (2009) a réussi à quantifier des écoulements à travers un ouvrage. Certains auteurs, comme Johansson (1997), proposent d'utiliser ces méthodes en surveillance. L'évolution de la grandeur physique mesurée, i.e. la résistivité ou le potentiel spontané, est alors suivie tout au long de l'année. La tendance saisonnière, mise en évidence par les mesures, renseigne sur la présence de fuites et offre la possibilité d'estimer leur vitesse. Notons que cette approche dérive de l'analyse des données de température mesurées dans les piézomètres de grande profondeur, également développée par Johansson (1997). Cette approche, mise en place pour la surveillance de plusieurs ouvrages en Suède, reste néanmoins réservée aux ouvrages de grandes dimensions. Les méthodes géophysiques ont le grand intérêt d'être non destructives. Elles peuvent être appliquées sans dégrader les ouvrages ou perturber leur utilisation (production hydro-électrique, navigation, etc...), contrairement à des méthodes géotechniques nécessitant des forages ou des excavations. Cependant, l'analyse des mesures géophysiques nécessite bien souvent l'utilisation de modèles inverses reposant sur des hypothèses importantes. Les résultats des analyses restent souvent sous réserves de ces approximations.

Les méthodes thermométriques constituent le deuxième groupe de méthodes de détection présenté. Elles reposent sur un principe assez simple : un écoulement traversant un ouvrage perturbe en son voisinage la température de celui-ci.

En Allemagne, la mesure de température est utilisée depuis plus de vingt ans pour le diagnostic d'ouvrage. Une méthode efficace de sondage thermométrique a été mise au point par le bureau d'étude GTC Kappelmeyer. Elle permet de reconstruire le champ de température en 2D le long de la ligne de sondage. Les zones de fuites sont déterminées d'après les contrastes de température. Notons que cette méthode nécessite le fonçage de tubes fins pour les sondages.

Le relevé de profils verticaux de température peut également être fait à l'intérieur de structures existantes : les piézomètres. Des informations complémentaires à celles fournies par la piézométrie, permettent la localisation de la zone d'écoulement : le suivi des profils thermiques, au cours du temps, permet d'obtenir une estimation de la vitesse des écoulements. Johansson (1997) a développé deux méthodes donnant accès à la vitesse à partir des données

de température. L'une et l'autre sont basées sur la propagation des fluctuations saisonnières à l'intérieur de l'ouvrage.

Le développement des capteurs à fibre optique a apporté un regain d'intérêt pour les méthodes thermiques pour la surveillance d'ouvrage. Grâce à cette technologie, des mesures de température réparties dans le temps et dans l'espace sont obtenues. Deux types de mesures de température par fibre optique ont été présentés : les mesures actives et les mesures passives. Les travaux de Perzlmaier (2007) ont montré la possibilité de détecter et quantifier les fuites à partir des mesures actives. Pour les mesures passives, les méthodes varient suivant la position de la fibre optique dans l'ouvrage. Lorsque l'influence de l'air est négligeable et le milieu saturé, les méthodes de Johansson (1997) peuvent être appliquées. Ce sont les seules qui ont été développées dans un but de quantification des écoulements. La méthode impulsionnelle développée par Radzicki (2009) est adaptable à différentes situations : terrain saturé ou non, influence majoritaire de l'air et/ou de l'eau. Les deux méthodes de Khan (2009) reposent sur l'analyse statistique des données de température. Ces méthodes de détection, basées sur la décomposition de sources, ont été initialement développées pour l'analyse des données d'une fibre placée à faible profondeur sous le talus aval.

Avant de développer les méthodes utilisées dans un but de quantification, le cadre physique ainsi que les principales équations des écoulements et transferts de chaleur à l'intérieur d'un ouvrage hydraulique en remblai sont présentés dans le chapitre suivant.

Description des transferts d'eau et de chaleur dans une digue

Ce chapitre présente une description physique et mathématique des transferts d'eau et de chaleur à travers le sol. Cette description permettra d'introduire le code de calcul utilisé pour modéliser les transferts thermo-hydrauliques à travers un ouvrage hydraulique. Le modèle établi permettra d'obtenir des données synthétiques, utiles pour le test des modèles de caractérisation de fuite présentés au chapitre suivant.

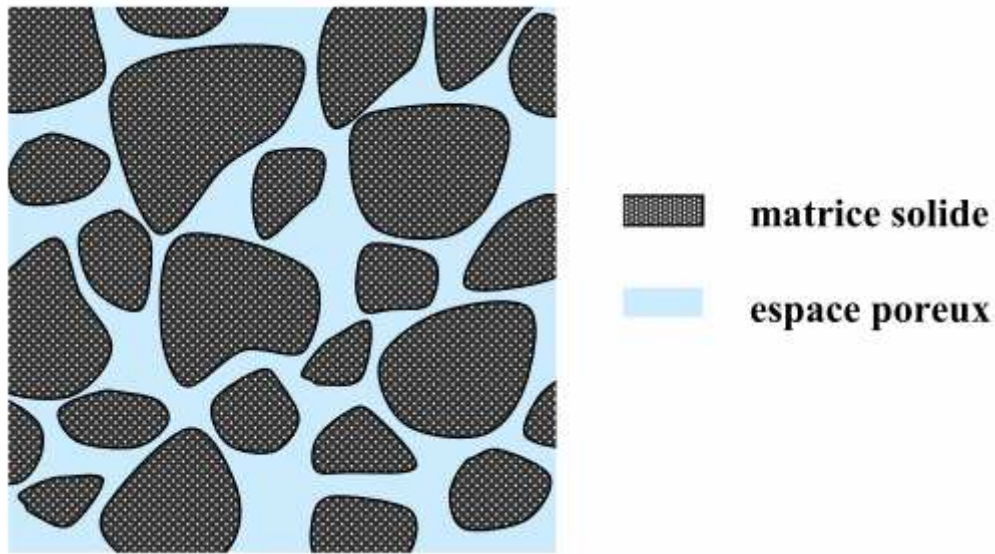


FIGURE 3.1.1: Matrice solide et espace poreux (extrait de Daian (2010))

3.1 Écoulements dans un milieu poreux, le sol

3.1.1 Description du sol en tant que milieu poreux

Un milieu poreux se compose d'une matrice solide et de son complémentaire géométrique (Fig. 3.1.1), l'espace poreux, qui peut être occupé par un ou des fluides (Daian, 2010). Le sol rentre dans la catégorie des milieux poreux.

Un volume de sol est constitué d'un assemblage de grains, de tailles et de formes variées. Les interstices ou vides entre les particules de sol, sont appelés pores. Bien souvent dans un sol, les pores contiennent un fluide sous forme liquide, généralement de l'eau, ou gazeuse, généralement de l'air. La connectivité des pores entre eux permet le passage du fluide. La circulation d'un fluide est d'autant plus facile que la connectivité, le nombre et la taille des pores sont grands. La structure du milieu influe également sur ses propriétés mécaniques. Un sol contenant des particules de tailles variées où les particules de plus faibles diamètres comblent les interstices entre les particules de plus gros diamètres, sera d'autant plus résistant (par exemple au cisaillement) qu'un sol ne comptant que des particules de gros diamètres.

Cette description du sol, en tant que milieu poreux illustre la dépendance des propriétés mécaniques et hydrauliques du sol à sa structure : taille, répartition et connectivité des pores. Un ensemble de paramètres, mentionnés dans le paragraphe suivant, caractérise la structure du milieu poreux.

3.1.1.1 Paramètres des milieux poreux

Le volume élémentaire représentatif Un milieu poreux est hétérogène. Ses propriétés doivent être définies localement. Le volume étudié doit être suffisamment grand pour être

statistiquement représentatif mais suffisamment petit pour tenir compte des hétérogénéités du milieu. Un tel volume est classiquement appelé volume élémentaire représentatif (VER).

Paramètres structuraux L'espace poral peut contenir un ou des fluides. Dans le cas des sols, les fluides fréquemment rencontrés sont l'air et l'eau. Lorsque les pores du sol contiennent à la fois de l'air et de l'eau, le sol est dit non-saturé. Il se compose alors de trois phases : une phase solide, la matrice solide, une phase liquide et une phase gazeuse. Les deux dernières phases sont constituées par le fluide compris dans les pores du sol (air ou eau). Considérons un VER de volume total V_T de sol, nous noterons : V_S , le volume de la phase solide, V_V le volume des vides et V_w le volume d'eau.

La porosité La porosité quantifie le pourcentage de volume de vide compris dans le sol. La porosité ϕ est le rapport du volume des vides sur le volume total.

$$\phi = \frac{V_V}{V_T}$$

La porosité dans la plupart des sols varie entre 25% à 50% (Porras Velásquez, 2007 p.30).

Dans le cas d'un écoulement en milieu poreux non saturé, i.e. lorsque $V_w < V_V$, seule une partie du volume des vides est utilisée. On définit alors la porosité effective ϕ_e comme étant le pourcentage de vide où il y a un écoulement.

L'indice des vides L'indice des vides e exprime la part du volume des vides par rapport au volume de la matrice solide.

$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

Paramètres hydrauliques

La teneur en eau La teneur en eau θ reflète le pourcentage d'eau liquide contenu dans le volume total de sol.

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

Le degré de saturation La degré de saturation exprime la part du volume des vides remplie par l'eau :

$$s = \frac{V_w}{V_V}$$

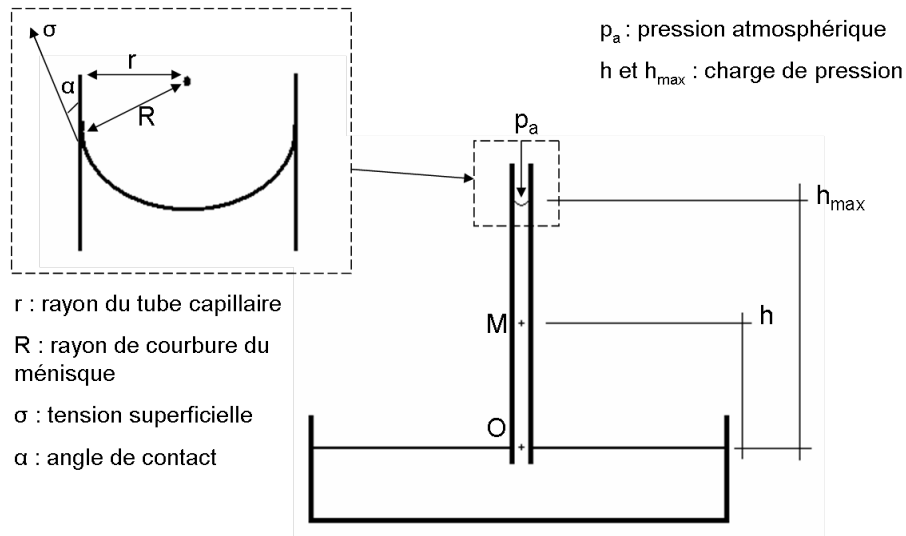


FIGURE 3.1.2: Remontée capillaire à l'intérieur d'un tube de faible diamètre plongé dans un récipient d'eau

La perméabilité intrinsèque La perméabilité intrinsèque d'un milieu poreux caractérise sa capacité à transmettre un écoulement. Ce paramètre ne dépend que de la structure et de la connectivité des pores : elle est indépendante du fluide qui la traverse. La perméabilité intrinsèque d'un milieu poreux peut être calculée à partir de sa courbe granulométrique en suivant la loi de Hazen : $k = 6,54 \cdot 10^{-4} d_{10}^2$. k s'exprime en m^2 .

d_{10} [m] Diamètre maximal des grains de plus petite taille du sol qui représentent 10% de la fraction massique du sol

3.1.1.2 Phénomènes hydrauliques propres au milieu poreux : la capillarité et l'adsorption

Lorsque le sol est partiellement saturé, l'espace poral est occupé par l'air et par l'eau. L'occupation de cet espace par l'un ou l'autre des deux fluides est régie par le phénomène de capillarité et d'adsorption.

La capillarité

La loi de Jurin Le phénomène de capillarité est mis en évidence par une expérience simple. Lorsqu'un tube de faible diamètre, appelé tube capillaire est plongé dans un récipient contenant un volume d'eau, on observe à l'intérieur du tube capillaire une remontée d'eau à un niveau supérieur à la surface libre dans le récipient (figure 3.1.2).

A la surface de l'eau contenue dans le tube capillaire se forme une interface entre l'eau et l'air qui se comporte de la même manière qu'une membrane sous tension. La force linéaire de tension appliquée à la membrane est appelée tension superficielle σ [N/m]. Cette force s'applique dans une direction qui forme un angle α , appelé angle de contact, avec les parois

du tube. La valeur de l'angle de contact dépend du fluide (ici de l'eau) et du solide. Elle traduit l'affinité du fluide avec le solide. Les forces s'appliquant sur le volume d'eau dans le tube capillaire en surélévation par rapport au niveau d'eau dans le récipient sont les suivantes : le poids du volume d'eau, la résultante des forces de tension superficielle et la résultante des forces de pression de l'air. Lorsque le système est en équilibre, la somme de ces forces est nulle. Intéressons nous à la projection verticale de chacune de ces forces. Les notations introduites dans la figure 3.1.2 sont reprises. La composante verticale de la résultante des forces de tension superficielle s'écrit : $2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \alpha$. Le poids n'a qu'une composante verticale : $\rho_w g h_{max} \pi r^2$. Enfin la composante des forces de pression de l'air est : $p_a \pi r^2$. La condition d'équilibre de ces forces s'écrit :

$$-2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \alpha + \rho_w g h_{max} \pi r^2 - p_a \pi r^2 = 0 \iff -\frac{2 \cos \alpha}{r} - \rho_w g h_{max} - p_a = 0$$

La pression atmosphérique est prise comme référence. Une valeur nulle lui est affectée. La hauteur d'ascension capillaire s'écrit donc :

$$h_{max} = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{\rho_w g r} \quad (3.1.1)$$

σ [Nm ⁻¹]	Tension superficielle
α [rad]	Angle de contact avec les parois du tube
r [m]	Rayon du tube capillaire
ρ_w [kg · m ⁻³]	Masse volumique de l'eau
g [ms ⁻¹]	Accélération de la pesanteur

L'équation 3.1.1 constitue la loi de Jurin. La hauteur d'ascension capillaire est d'autant plus grande lorsque le rayon diminue.

La différence de pression entre le point M et le point O est égale au poids de la colonne d'eau située entre ces deux points : $p_O - p_M = \rho_w g h$. Or la pression au point B est la pression atmosphérique, prise comme nulle, donc :

$$p_M = -\rho_w g h = -\Psi \quad (3.1.2)$$

La pression dans la colonne, prise relativement à la pression de l'air, est appelée pression capillaire. Cette pression est négative. Les forces de tension superficielles en attirant la phase liquide sont responsables de cette dépression. Ψ , quantité positive, est appelée potentiel capillaire. Il peut être exprimé en colonne d'eau : la valeur obtenue est appelée suction.

La frange capillaire La porosité du sol peut être vue comme un réseau de tubes capillaires. Le phénomène de capillarité s'y développe et peut entraîner une remontée d'eau au-dessus du niveau de la nappe. La zone de remontée capillaire au-dessus de la nappe est appelée frange capillaire. Nous avons vu que l'intensité des remontées capillaires dépend de la

dimension du tube capillaire et du coefficient de tension superficielle, elle-même fonction du fluide et du solide. La hauteur de la frange capillaire est donc fonction de la texture et de la structure du sol. Dans les interstices de faibles dimensions, comme c'est le cas pour l'argile, la pression capillaire est importante.

L'adsorption Dans les sols, l'adsorption correspond à la fixation des molécules d'eau aux parois solides. Les forces d'attraction moléculaires entre les molécules de la phase solide et liquide sont responsables de cette fixation. La couche d'eau adsorbée est particulièrement liée à la surface du solide : des pressions supérieures à 10^{10} Pa sont nécessaires pour détacher cette couche d'eau.

3.1.2 Écoulements en milieux poreux

3.1.2.1 Description de l'état énergétique de l'eau dans le sol

Du fait de la faible dimension des pores, les vitesses d'écoulement dans les sols sont généralement faibles. L'énergie cinétique, faisant intervenir le carré de la vitesse, est donc négligeable devant les autres termes. Par approximation, l'énergie de l'eau dans le sol n'est constituée que de son énergie potentielle. Celle-ci est relative au champ de l'ensemble des forces auxquelles l'eau est soumise. Pour chaque type de force agissant sur l'eau est associée une composante de l'énergie potentielle. Dans le cadre de nos applications, les forces auxquelles est soumise l'eau sont : les forces de gravité et les forces de pression.

Description des champs de force et du potentiel associé

Le champ de force de gravité Le champ de force de gravité est associé à l'énergie potentielle de gravité notée Ψ_g . Cette énergie provient du travail des forces gravitaires lors d'un déplacement. En un point d'altitude z (relativement à une cote de référence prise nulle), le potentiel de gravité s'exprime : $\Psi_g = \rho_w \cdot g \cdot z$ (z orienté positivement vers le haut)

Le champ de pression Deux types de champ de pression sont à distinguer : le champ de pression positif et le champ de pression négatif. Le premier est associé aux pressions hydrostatiques, le second aux pressions matricielles.

Le champ de pression hydrostatique Le champ des forces de pression hydrostatique Ψ_{ph} est associé à l'énergie potentielle de pression hydrostatique. Ce potentiel de pression correspond, en un point du sol, au poids de la colonne d'eau qui le surmonte. Lorsque le milieu est saturé, le potentiel de pression est non nul. En milieu non saturé, sa valeur est nulle. En un point, il s'exprime : $\Psi_{ph} = \rho_w \cdot g \cdot h$, h étant la hauteur de la colonne d'eau surmontant le point d'étude considéré.

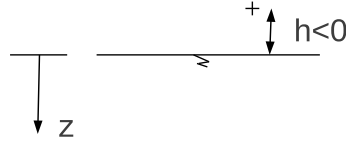


FIGURE 3.1.3: Repère pour définir la charge de pression

Le champ de pression matricielle Le champ de pression matricielle est associé à l'énergie potentielle de pression matricielle Ψ_{pm} . Les forces capillaires et les forces d'adsorption retiennent l'eau dans le sol. Le potentiel de pression matricielle est l'énergie qu'il faut apporter pour extraire l'eau du sol. Ce potentiel de pression est négatif : la pression est inférieure à celle de l'eau libre. Pour un tube capillaire, une expression du potentiel de pression matricielle est donnée par la loi de Jurin. Le potentiel de pression matricielle s'exprime de la même manière que le potentiel de pression hydrostatique : $\Psi_{pm} = \rho_w \cdot g \cdot h$ où h est la hauteur du point considéré par rapport à la surface de la nappe mais comptée négativement. Ψ_{pm} est donc négatif en milieu non saturé et nul en milieu saturé.

Finalement, pour le potentiel de pression Ψ_p , une expression commune peut être adoptée : $\Psi_p = \rho_w \cdot g \cdot h$. Pour un point situé sous la nappe, h est positif (Fig. 3.1.3). Pour un point situé au-dessus de la nappe, h est négatif.

L'expression du potentiel total Dans le cadre de nos applications, l'énergie potentielle totale de l'eau Ψ peut s'exprimer comme la somme de l'énergie potentielle de gravité et de l'énergie de pression :

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_p \quad (3.1.3)$$

Dans notre étude, les variations de la constante de gravitation peuvent être négligées. De plus, l'eau étant considérée comme incompressible, ρ_w ne varie pas. Le produit $\rho_w \cdot g$ est donc une constante. En divisant le potentiel total Φ par $\rho_w \cdot g$, l'expression obtenue a la dimension d'une hauteur appelée la charge hydraulique H qui est la somme d'une charge de gravité z et d'une charge de pression h :

$$H = z + h \quad (3.1.4)$$

Potentiel de l'eau et écoulement Dans les paragraphes précédents l'énergie potentielle de l'eau, appelée plus simplement potentiel de l'eau, a été définie. Dans un champ de potentiel, les mouvements se font des zones de potentiels élevés vers celles de plus faible potentiel. Les gradients de potentiels, les gradients de charge hydraulique, constituent la force motrice des écoulements. Des forces de résistances s'opposent à la force motrice. L'intensité de l'écoulement, quantifiée par sa vitesse ou son débit, résulte de l'opposition de ces deux forces.

3.1.2.2 Loi de Darcy

En 1856, Henri Darcy a observé expérimentalement que le débit à travers un milieu poreux saturé est proportionnel à la perte de charge hydraulique qui lui est associée. La loi de Darcy exprime cette observation : le débit par unité de surface est proportionnel au gradient spatial de charge hydraulique.

$$\frac{Q}{S} = -K_s \cdot \nabla H \quad (3.1.5)$$

Q [m ³ s ⁻¹]	Débit
S [m ²]	Surface
H [m]	Charge hydraulique

Le coefficient de proportionnalité K_s [ms⁻¹] est la conductivité hydraulique à saturation. Il traduit l'effet des forces de résistance à l'écoulement. Son expression (Eq. 3.1.6), en milieu saturé homogène et isotrope, intègre l'effet des frottements avec la matrice solide.

$$K_s = \frac{k \rho_f g}{\mu} \quad (3.1.6)$$

k [m ²]	Perméabilité intrinsèque
ρ_f [kg.m ⁻³]	Masse volumique du fluide
μ [Pa.s]	Viscosité dynamique

Ces frottements sont d'une part intrinsèquement liés à la structure de la matrice solide. La perméabilité intrinsèque, proportionnelle à K_s , traduit ces frottements : pour circuler à travers le milieu poreux, l'écoulement doit se frayer un chemin à travers les pores. D'autre part, les frottements sont liées à la viscosité dynamique du fluide. Cette propriété, inversement proportionnelle à la conductivité, traduit l'intensité des forces de friction du liquide avec la matrice solide.

L'expression de K_s peut être étendue aux milieux non homogènes et isotropes. Dans ce cas, la conductivité hydraulique est exprimée non plus par un scalaire mais par un tenseur que nous noterons \mathbf{K}_s ¹.

Le débit par unité de surface dans Eq.3.1.5 a la dimension d'une vitesse. Cette vitesse est communément appelée vitesse de Darcy v_D . Notons bien que la vitesse de Darcy est fictive : elle représente la vitesse moyenne d'écoulement relativement à une surface de sol donnée.

Limites de la loi de Darcy La loi de Darcy n'est valable que pour des écoulements permanents en régime laminaire. Si les vitesses d'écoulement sont trop importantes, les pertes par frottement ne sont plus proportionnelles à la vitesse, comme c'est le cas dans la loi de Darcy, mais fonction du carré de la vitesse.

1. Les tenseurs seront notés en gras.

Le nombre de Reynolds (Eq. 3.1.7) peut être utilisé pour délimiter le domaine de validité de la loi de Darcy.

$$Re = \frac{\bar{v}.L}{\nu} \quad (3.1.7)$$

avec :

- $\bar{v} [\text{ms}^{-1}]$ Vitesse moyenne de l'écoulement
- $L [\text{m}]$ Longueur caractéristique de l'écoulement
- $\nu [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$ Viscosité cinématique

Généralement, les limites suivantes sont admises ((Musy et Soutter, 1991)) :

- $Re < 1$: régime laminaire, la loi de Darcy est applicable.
- $1 \leq Re < 60$: régime transitoire, la loi de Darcy est applicable avec la correction de Dupuits, $a.v + b.v^2 = -K.\frac{\Delta H}{L}$
- $Re \geq 60$: Régime turbulent, la loi de Darcy n'est plus applicable

Si le sol est fracturé ou si des conduits se sont formés suite à une érosion interne, l'écoulement ne rencontre plus les mêmes forces de résistance que dans un milieu poreux. Par conséquent, la loi de Darcy ne convient plus pour décrire les écoulements dans ces zones. Les lois d'hydraulique en charge peuvent être utilisées : Hagen Poiseuille pour les écoulements laminaires et Darcy-Weisbach, pour les écoulements turbulents (Porrás Velásquez, 2007 p.37).

Généralisation de la loi de Darcy au milieu non saturé En milieu non saturé, le débit par unité de surface reste proportionnel au gradient de charge hydraulique : la loi de Darcy reste donc valable. Cependant, en milieu non saturé, un nouveau paramètre intervient. Le tenseur de conductivité hydraulique, noté \mathbf{K} , tout comme la charge hydraulique (plus exactement la charge de pression h) dépend de la teneur en eau du milieu θ . Eq. 3.1.5 peut donc s'exprimer de la manière suivante :

$$\vec{v}_D = -\mathbf{K}(\theta).\nabla H(\theta) = -\mathbf{K}(\theta).\nabla(h(\theta) + z) \quad (3.1.8)$$

Plus la teneur en eau baisse et plus la charge de pression diminue. Il en va de même pour la conductivité hydraulique. Pour obtenir une estimation de \vec{v}_D par Eq. 3.1.8, il est nécessaire de connaître les courbes $K(\theta)$ et $h(\theta)$, appelées courbes caractéristiques du sol.

Lorsque la teneur en eau baisse, la conductivité hydraulique du sol diminue (figure 3.1.4). La conductivité hydraulique \mathbf{K} peut s'exprimer comme le produit du tenseur de conductivité hydraulique à saturation \mathbf{K}_s par une fonction scalaire dépendant de la teneur en eau et comprise entre 0 et 1. Cette fonction est appelée conductivité relative K_r : $\mathbf{K} = \mathbf{K}_s K_r(\theta)$.

Les courbes caractéristiques du sol Ces courbes, pour un sol donné, ne sont pas fixes. Elles évoluent en fonction du cycle de hausse et baisse de la teneur en eau. Ce phénomène d'hystérésis est lié au stockage et déstockage de l'eau dans les pores qui changent d'un cycle à l'autre.

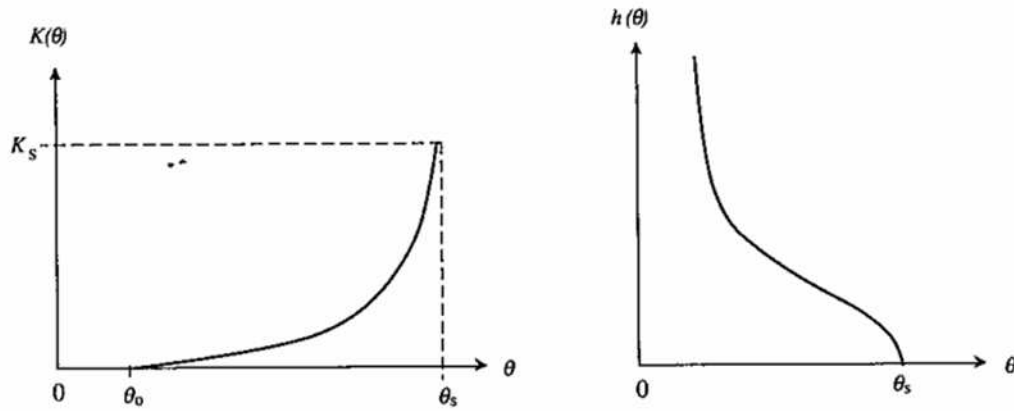
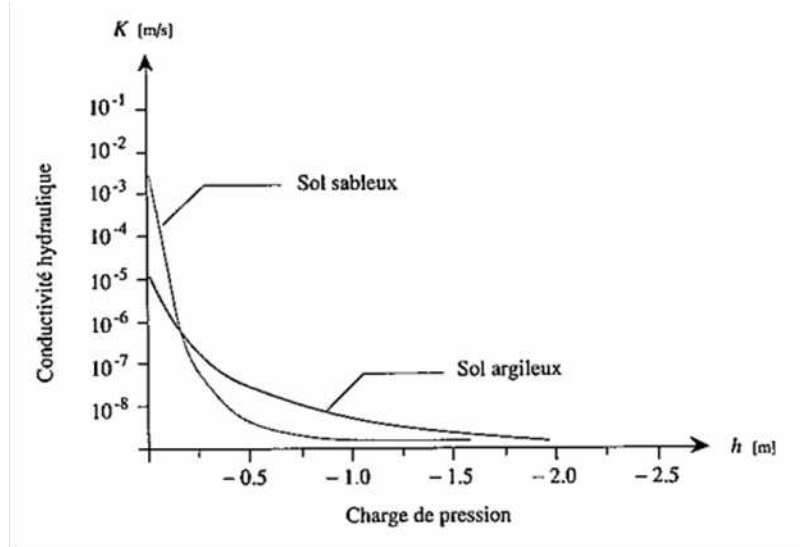


FIGURE 3.1.4: Conductivité hydraulique en fonction de la charge de pression (Haut) et courbes caractéristiques ci-dessous d'un sol homogène et isotrope non saturé : $K(\theta)$ (Bas gauche) et $h(\theta)$ (Bas droit) (extrait de Musy et Soutter, 1991)

La modélisation des courbes caractéristiques repose sur le calage de coefficient de lois mathématiques empiriques. Nous allons citer ici le modèle de Van Genuchten utilisé dans certaines modélisations dans le cadre de cette thèse. Ce modèle présente l'avantage d'être valide pour une large gamme de teneur en eau. De plus, étant donné l'utilisation fréquente de ce modèle pour l'étude des milieux non saturés, les coefficients empiriques du modèle de Van Genuchten sont connus pour de nombreux sols.

Modélisation de la relation $\theta(h)$ à partir du modèle de Van Genuchten Trois paramètres empiriques doivent être renseignés : α , m et n .

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (3.1.9)$$

avec

θ_r Teneur en eau résiduelle pour laquelle le potentiel de pression h tend vers l'infini

θ_s Teneur en eau à saturation

Modélisation de la relation $K(\theta)$ à partir du modèle de Van Genuchten Pour la modélisation de la conductivité en fonction de la teneur en eau, seul un paramètre empirique m est nécessaire.

$$K(\theta) = K_r(\theta) \cdot K_s = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2 \cdot K_s \quad (3.1.10)$$

3.1.2.3 formulation de l'équation des écoulements en milieu poreux

Équation de continuité L'équation de continuité (Eq. 3.1.11) exprime un bilan de conservation de la masse : la variation de la masse M du système considéré est égale à la différence des flux entrant et sortant. Pour un VER de sol, ce bilan s'écrit :

$$\frac{\partial(M)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_w \vec{v})V + Q_s \quad (3.1.11)$$

avec

\vec{v} Vitesse d'écoulement de Darcy [ms^{-1}]

V Volume du VER considéré [m^3]

Q_s Terme source [kg.s^{-1}]

La masse du VER dépend de la teneur en eau de ce dernier : $M = \rho_w \theta V$. En supposant que le milieu ne se déforme pas, le premier terme de Eq. 3.1.11 se réécrit :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} V \quad (3.1.12)$$

Finalement en combinant les équations Eq. 3.1.11 et Eq. 3.1.12, l'équation de continuité du VER de sol s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{v} + Q_{s2} \quad (3.1.13)$$

Q [s^{-1}] représente le terme source.

Cette équation peut s'écrire sous différentes formes. Le degré de saturation « s » peut être utilisé à la place de la teneur en eau θ . Dans l'équation 3.1.15 la variable principale est la teneur en eau θ . La charge de pression h (Par. 3.1.2.1), fonction de la saturation, peut être utilisée comme variable principale. La formulation de Diersch et Perrochet (2002) utilise ce paramétrage et aboutit à la formulation suivante de l'équation de continuité :

$$S_0 s(h) \frac{\partial h}{\partial t} + \phi \frac{\partial s(h)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} = Q_{s2} \quad (3.1.14)$$

où

S_0 est la compressibilité du volume de stockage [m^{-1}]

\vec{v} est la vitesse de Darcy [ms^{-1}]

ϕ est la porosité [-]

Q_{s2} est un terme source [s^{-1}]

Équation de Richards La combinaison de l'équation de continuité (Eq. 3.1.13) et de la loi de Darcy (Eq. 3.1.8) aboutit à la formulation de l'équation des écoulements en milieu poreux (saturé ou non) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla \cdot \{K_r(\theta) \mathbf{K}_s \nabla (h + z)\} = Q \quad (3.1.15)$$

L'équation 3.1.15 est connue sous le nom d'équation de Richards.

Notons qu'en utilisant l'équation 3.1.14, une autre formulation de l'équation de Richards est obtenue :

$$S_0 s(h) \frac{\partial h}{\partial t} + \phi \frac{\partial s(h)}{\partial t} - \nabla \cdot \{K_r(h) \mathbf{K}_s \nabla (h + z)\} = Q \quad (3.1.16)$$

3.2 Les transferts thermiques en milieu poreux

La température est une mesure de l'agitation thermique d'un corps. Sa valeur varie suivant l'espace et le temps. Dans un sol, le champ de température résulte d'échanges thermiques internes et externes. Les échanges externes déterminent la quantité d'énergie thermique emmagasinée par le sol. Quant aux échanges internes, qui se déroulent dans un milieu poreux, ils règlent la distribution de l'énergie emmagasinée notamment en fonction des paramètres thermiques du sol, variables dans le temps et dans l'espace.

3.2.1 Les échanges de chaleur interne

Les échanges de chaleur à l'intérieur du sol, vu comme un milieu poreux, sont assurés par deux processus de transfert : les transferts par conduction (aussi appelé diffusion) et les transferts par convection.

3.2.1.1 Les transferts de chaleur par conduction

Dans les transferts de chaleur par conduction, l'énergie thermique est propagée de proche en proche du fait des collisions moléculaires. Lorsque l'agitation moléculaire et donc la température n'est pas homogène à l'intérieur d'un corps, des transferts d'énergie thermique se produisent des régions de température élevée aux régions de plus faible température : la température se diffuse dans le corps jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint. Le gradient thermique est le moteur de la diffusion et donc des flux d'énergie.

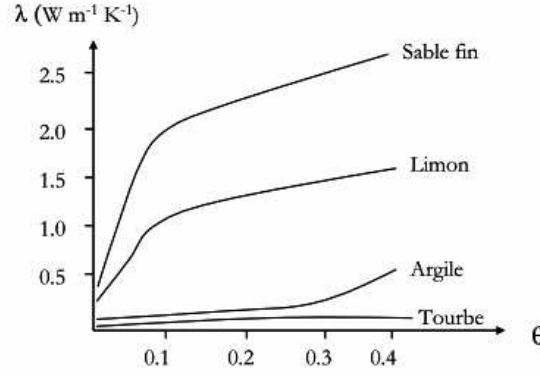


FIGURE 3.2.1: Variation de la conductivité thermique de différents sols en fonction de la teneur en eau (d'après Musy et Soutter, 1991)

Loi de Fourier La loi de Fourier (Eq. 3.2.1) exprime le lien entre le flux de chaleur par conduction $J_{T_{cond}}$ et le gradient spatial de température. Les deux quantités sont proportionnelles. Le coefficient de proportionnalité, la conductivité thermique λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], exprime la résistance opposée par le matériau à la diffusion de la chaleur.

$$J_{T_{cond}} = -\lambda \nabla T \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (3.2.1)$$

Lorsque le matériau est homogène et isotrope, la conductivité est un scalaire. Pour un matériau anisotrope, la conductivité s'exprime par un tenseur du second ordre que l'on notera λ .

Conductivité thermique en milieu poreux Le sol, matériau poreux, est constitué de trois phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. La détermination du coefficient de conductivité thermique pour un VER (Volume Élémentaire Représentatif) de sol, dépend de la conductivité thermique de chaque phase et de la structure de la matrice solide.

La conductivité thermique de l'air λ_a et de l'eau λ_w peut être considérée comme constante. En revanche, la conductivité de la matrice solide λ_s dépend de sa nature et de sa composition : la texture (type et répartition des minéraux) et la présence de matière organique ont notamment une grande influence (Fig. 3.2.1).

La structure du milieu poreux définit la proportion d'air, d'eau et de solide contenu dans le VER. La porosité ϕ et la teneur en eau θ définissent l'importance volumique de chaque phase. Finalement la conductivité thermique du VER, que nous appellerons conductivité équivalente λ_{eq} , peut s'exprimer comme une fonction, noté f , des propriétés thermiques des constituants du sol et de leur répartition : $\lambda_{eq} = f(\lambda_s, \lambda_w, \lambda_a)$.

Si l'on suppose que les trois phases du milieu poreux agissent sur le flux thermique comme des résistances disposées en parallèle, alors λ_{eq} s'exprime de la forme suivante :

$$\lambda_{eq} = (1 - \phi)\lambda_s + \theta\lambda_w + (\phi - \theta)\lambda_a$$

3.2.1.2 Les transferts de chaleur par convection

Les transferts de chaleur par convection interviennent lorsqu'un fluide traverse le matériau. Le fluide transporte une partie de l'énergie thermique. L'agitation thermique des molécules transportées par le fluide se transmet à celles du solide aux zones de contact fluide/solide. Notons que la transmission d'énergie peut également s'effectuer du solide vers le fluide.

Il existe deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée.

Convection naturelle En convection naturelle, le mouvement du fluide est lié au gradient de température au sein du fluide. Les différences de température sont responsables de changements de densité du fluide qui provoque la mise en mouvement de celui-ci. Ce phénomène est bien visible dans l'atmosphère avec le mouvement des masses d'air chaudes et froides.

Convection forcée En convection forcée, le moteur de l'écoulement n'a pas d'origine thermique. Le gradient hydraulique est responsable du mouvement du fluide. Dans le sol, celui-ci est décrit par la loi de Darcy. Ce sont les mouvements d'eau, qui assurent la plupart des transferts par convection. Pour notre étude, qui concerne des écoulements dans les ouvrages hydrauliques, la convection naturelle sera négligée dans la suite des développements et le terme convection désignera uniquement la convection forcée.

Capacité calorifique volumique La quantité d'énergie thermique échangée par convection dépend bien entendu de la vitesse du fluide, qui dans les milieux poreux est caractérisée par la vitesse de Darcy \vec{v}_D , mais aussi de la capacité du matériau à stocker de l'énergie transmise par l'écoulement. Cette caractéristique est quantifiée par le coefficient de capacité thermique du sol C_T . Il définit l'énergie dQ à apporter à un corps pour l'élever d'une température dT :

$$C_T = \frac{dQ}{dT} [\text{JK}^{-1}]$$

En pratique, on utilise la quantité normalisée de C_T par la masse du corps M , notée c_p :

$$c_p = \frac{C_T}{M} [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$$

c_p est appelé capacité calorifique massique. Dans les équations des transferts d'énergie thermique, c_p apparaît en facteur de la masse volumique du corps étudié ρ . Le produit ρc_p [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$] porte le nom de capacité calorifique volumique.

Le sol est un milieu contenant plusieurs phases. Sa capacité calorifique volumique $(\rho c_p)_{sol}$ s'exprime comme la moyenne pondérée de la capacité calorifique volumique de l'air $(\rho c_p)_a$, de l'eau $(\rho c_p)_w$ et de la matrice solide $(\rho c_p)_s$:

$$(\rho c_p)_{sol} = (1 - \phi)(\rho c_p)_s + \theta(\rho c_p)_w + (\phi - \theta)(\rho c_p)_a \quad (3.2.2)$$

3.2.1.3 Caractéristiques des transferts par conduction et convection

Dans un sol traversé par un écoulement, les transferts par conduction et par convection coexistent. La modalité des transferts dépend de la valeur des paramètres thermiques du sol et de l'intensité des écoulements.

La diffusivité thermique Précédemment, nous avons vu que le phénomène de conduction est caractérisé par la conductivité thermique. Quant au phénomène de convection, il dépend fortement de la capacité calorifique volumique du milieu. La diffusivité thermique est le rapport de ces deux coefficients. Pour un VER de sol, la diffusivité, notée a , s'écrit :

$$a = \frac{\lambda_{eq}}{(\rho c_p)_{sol}} \quad [m^2/s] \quad (3.2.3)$$

λ_{eq} est la conductivité équivalente du VER de sol.

$(\rho c_p)_{sol}$ est la capacité volumique du VER de sol.

Physiquement, la diffusivité caractérise la rapidité avec laquelle un matériau peut s'échauffer : elle augmente avec sa capacité à transmettre une agitation thermique λ_{eq} et diminue lorsque sa résistance à l'échauffement $(\rho c_p)_{sol}$ augmente .

Le nombre de Péclet Le nombre de Péclet Pe permet de caractériser la répartition des modes de transfert. Son expression représente le rapport entre les transferts par convection et ceux par conduction. Pour un VER de sol, il s'écrit :

$$Pe = \frac{(\rho c_p)_w v_D L}{\lambda_{eq}} = \frac{v_D L}{a}$$

avec :

$(\rho c_p)_w$ **Capacité thermique volumique de l'eau** [$Jm^{-3}K^{-1}$]

v_D **Vitesse de Darcy** [ms^{-1}]

L **Longueur caractéristique (représentative de la taille des pores)** [m]

λ_{eq} **Conductivité thermique** [$Wm^{-1}K^{-1}$]

Pour caractériser la dominance d'un mode de transfert sur l'autre, les limites suivantes peuvent être retenues (Radzicki (2009)) :

- si $Pe < 1$, les transferts se font essentiellement par conduction
- si $Pe > 10$, les transferts par convection dominent
- si $1 < Pe < 10$, aucun mode de transfert ne prévaut sur l'autre

La dispersion La vitesse de Darcy représente une vitesse moyenne relativement à une section d'écoulement donnée. La vitesse réelle du fluide, la vitesse interstitielle, est non uniforme dans cette section. La structure du milieu poreux explique en partie ces différences de vitesse : les chemins d'écoulements sont multiples et de longueurs variées, d'où une distribution étalée des vitesses. Cette distribution non uniforme des vitesses interstitielles impacte les transferts

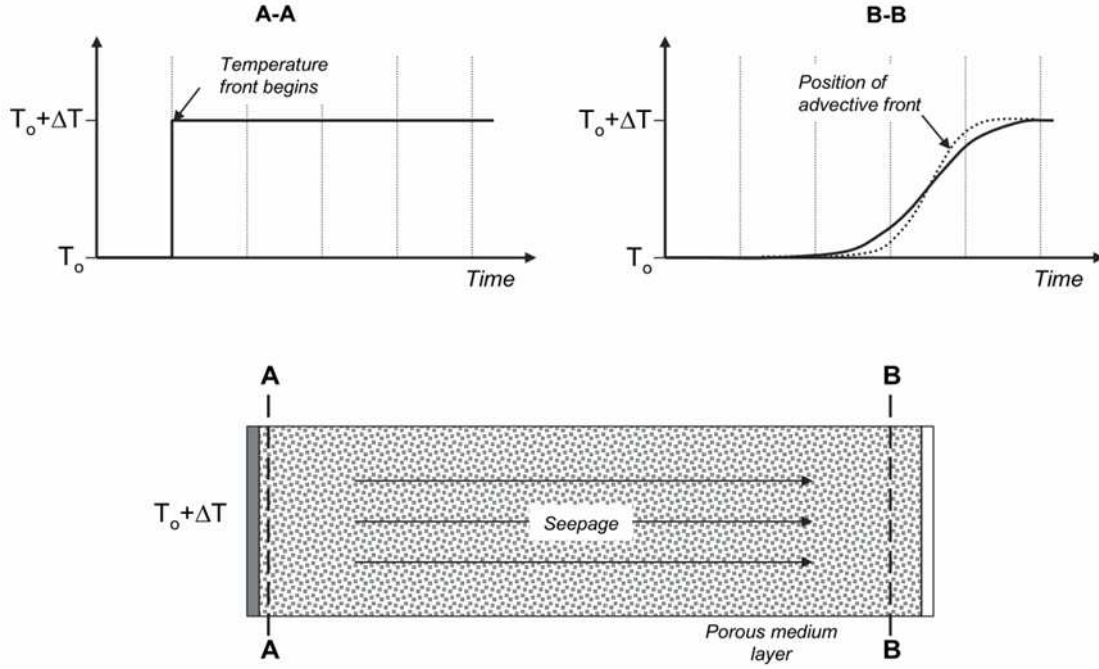


FIGURE 3.2.2: Représentation schématique des effets de la dispersion sur une barre 1D de milieu poreux (extrait de Porras Velásquez, 2007)

de chaleur. L'énergie thermique n'est pas transportée de manière uniforme. Ce phénomène d'étalement, lié à la distribution étalée des vitesses interstitielles, est appelé dispersion.

La figure 3.2.2 représente les effets de dispersion lors du transport d'un échelon de température à travers un milieu poreux 1D soumis à un écoulement. En se propageant dans le milieu, l'échelon est progressivement déformé en raison de la distribution non uniforme de la vitesse interstitielle.

L'effet du phénomène dispersif est pris en compte dans les équations de transfert thermique par l'ajout d'un terme dispersif au tenseur de conductivité thermique. La conductivité thermique totale λ_T s'écrit alors :

$$\lambda_{Tij} = \lambda_{eq}\delta_{ij} + (\rho c_p)_w \left[\alpha_T |\vec{v}_D| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_{D,i} v_{D,j}}{|\vec{v}_D|} \right] \quad (3.2.4)$$

où

λ_{eq} la conductivité thermique équivalente du sol [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

$(\rho c_p)_w$ la capacité volumétrique de l'eau [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$]

\vec{v}_D la vitesse de Darcy [ms^{-1}]

α_T Dispersivité transversale [m]

α_L Dispersivité longitudinale [m]

δ_{ij} le symbole de Kronecker $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$, sinon $\delta_{ij} = 0$

Le terme dispersif dans l'expression de la conductivité thermique totale (Eq. 3.2.4) fait apparaître deux coefficients relatifs à la dispersion :

- le coefficient de dispersion longitudinale α_L : il caractérise les effets de dispersion dans le sens de l'écoulement
- le coefficient de dispersion transversale α_T : il caractérise les effets de dispersion dans la direction transversale à l'écoulement

Les effets de dispersion sont plus importants dans la direction de l'écoulement. Généralement, on considère que la dispersion longitudinale est 10 fois plus forte que la dispersion transversale : $\alpha_L \approx 10\alpha_T$ (Porras Velásquez, 2007 p.63)

3.2.1.4 L'équation des transferts thermiques en milieu poreux

Considérons un VER de sol. On fait l'hypothèse qu'à tout instant, les trois phases du sol (solide, eau et air) sont de même température. La variation de température du VER au cours du temps est fonction des transferts d'énergie par conduction et convection. L'équation régissant ces transferts en milieu poreux s'écrit :

$$(\rho c_p)_{sol} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_T \nabla T) - (\rho c_p)_w \nabla \cdot (T \vec{v}) \quad (3.2.5)$$

avec

T la température du milieu poreux [K]

$(\rho c_p)_{sol}$ la capacité calorifique volumique du sol [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$]

$(\rho c_p)_w$ la capacité calorifique volumique de l'eau [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$]

λ_T le tenseur de conductivité thermique totale [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

\vec{v} la vitesse de Darcy [ms^{-1}]

L'équation 3.2.5, appelée équation d'advection/diffusion, montre clairement une dépendance du champ thermique à la vitesse de Darcy. Les champs de température et de vitesse sont liés. Le couplage thermo-hydraulique impose de connaître le champ de vitesse pour calculer le champ thermique.

3.2.2 Les échanges de chaleur externe

Dans toute la suite de cette section, on considère les échanges thermiques dans le sol à faible profondeur i.e. de la surface à quelques dizaines de mètres. L'énergie emmagasinée et libérée par le sol dépend de ses échanges avec d'une part l'atmosphère et d'autre part le sous-sol.

Concernant les transferts avec l'atmosphère, deux types d'échanges peuvent être distingués (Musy et Soutter (1991)) : les échanges radiatifs et les échanges de chaleur. En profondeur, les échanges avec le sous-sol se limitent à un transfert d'énergie géothermique.

3.2.2.1 Les échanges en surface

Les échanges radiatifs Le sol reçoit et transmet de l'énergie radiative.

L'énergie radiative reçue par le sol provient en majeure partie du soleil. La quantité d'énergie reçue dépend :

- des conditions climatiques : la couverture nuageuse diminue la quantité d'énergie radiative reçue. Cette dernière est fonction des alternances diurnes et des saisons qui, périodiquement, règlent la durée d'ensoleillement.
- de la couverture végétale et de la couleur du sol : Ces données vont notamment influencer le coefficient de réflexion du sol, appelé albédo, et par là même la quantité d'énergie radiative absorbée par le sol.

Tout corps en agitation thermique rayonne. Une partie de l'énergie thermique du sol est donc réémise vers l'atmosphère.

Les échanges de chaleurs Le sol échange de l'énergie avec l'atmosphère. Ces échanges se font principalement sous forme de chaleur sensible et de chaleur latente (Musy et Soutter (1991)).

Les échanges de chaleur sensible correspondent à des transferts d'énergie d'agitation thermique. L'air est un fluide en mouvement, les échanges de chaleur sensible se font donc principalement par convection naturelle ou forcée. Comme dans tout transfert convectif, les mouvements du fluide sont déterminants sur la quantité d'énergie échangée. Le vent, qui représente le mouvement des masses d'air, a donc un rôle déterminant sur les échanges de chaleur sensible.

Le transfert de chaleur latente peut être décrit comme un processus se déroulant en deux phases. La première correspond à une transformation de phase : l'eau contenue dans le sol est transformée en vapeur. Cette transformation nécessite un apport d'énergie : $2,3 \cdot 10^6$ J/Kg. L'énergie thermique du sol est utilisée pour cette transformation. La seconde phase du transfert est le transport de la vapeur vers l'atmosphère : c'est un transfert de masse.

3.2.2.2 Les échanges en profondeur : le flux géothermique

Les échanges avec le sous-sol se limitent à un transfert d'énergie géothermique. Cette énergie, transférée par conduction, provient de la radioactivité et s'exprime sous la forme d'un flux de chaleur appelé flux géothermique. Son amplitude dans la croûte terrestre est comprise entre 10^{-2} et 10^{-1} W/m² (Porrás Velásquez (2007) p.71). Le flux géothermique est responsable d'une augmentation de température avec la profondeur pouvant aller de 9°C/km à 36°C/km (Porrás Velásquez (2007) p.71). Dans les couches supérieures du sol, à faible profondeur (de 0 à 20m), le gradient géothermique est négligeable.

3.3 Le régime thermique du sol à faible profondeur

3.3.1 Description générale

Le champ de température du sol à faible profondeur varie en fonction des échanges extérieurs. Les échanges en surface dépendent fortement des conditions climatiques (ensoleillement, vent, etc.) qui varient de manière cyclique. Deux cycles périodiques peuvent être distingués : le cycle journalier, composé des alternances jour/nuit, et le cycle annuel. L'alternance des saisons définit le cycle annuel aussi appelé cycle saisonnier. La température en surface du sol dépend fortement de ces influences périodiques.

La propagation des sollicitations thermiques générées par les échanges extérieurs peut être qualifiée en terme de temps retard et d'amortissement par rapport à la sollicitation initiale. En un point donné du sol, la valeur du temps retard et de l'amortissement sont fonction des propriétés thermiques du milieu, notamment la conductivité thermique et la capacité thermique volumique. Rappelons que celles-ci, dépendent de la nature (texture), de la structure (porosité) et de la teneur en eau du sol.

A partir d'une certaine profondeur, l'amortissement est tellement élevé que la réponse thermique à la sollicitation initiale est négligeable. Cette profondeur est appelée point d'extinction, appellation reprise des travaux de Porras Velásquez (2007). Le même auteur cite que le point d'extinction des influences saisonnières se situent entre 5 m et 30 m. Sous cette profondeur, la température augmente progressivement en raison du gradient géothermique. Dans nos applications, ce gradient peut néanmoins être négligé. La température est alors considérée constante en-dessous du point d'extinction des influences saisonnières. La profondeur du point d'extinction des influences journalières est plus beaucoup faible : les variations de température journalière ne sont ressenties que sur quelques dizaines de centimètres.

3.4 Modélisation numérique des transferts thermo-hydrauliques dans un ouvrage hydraulique

Dans le but de tester les modèles de caractérisation de fuite, présentés au chapitre suivant, des données numériques issues de la modélisation du comportement thermo-hydraulique d'un ouvrage hydraulique ont été générées.

Un code de calcul, DigueOmatic², a été utilisé pour modéliser les transferts thermo-hydrauliques à l'intérieur d'un ouvrage hydraulique en terre homogène, sans étanchéité amont. Dans la suite de ce chapitre, nous appellerons cet ouvrage « digue simulée ». A sa base, la digue simulée, de forme trapézoïdale, est large de 32 m pour une hauteur de 5 m et une largeur en crête de 2 m (Fig. 4.1.3). Sur l'une de ses faces, la digue est supposée soumise à

2. DigueOmatic est un code de calcul développé par EDF pour l'étude de problème thermo-hydraulique. Le modèle a été validé par comparaison avec deux codes de calcul du commerce couramment utilisés pour ce type de problème : Feflow et Comsol (Zga, 2010).

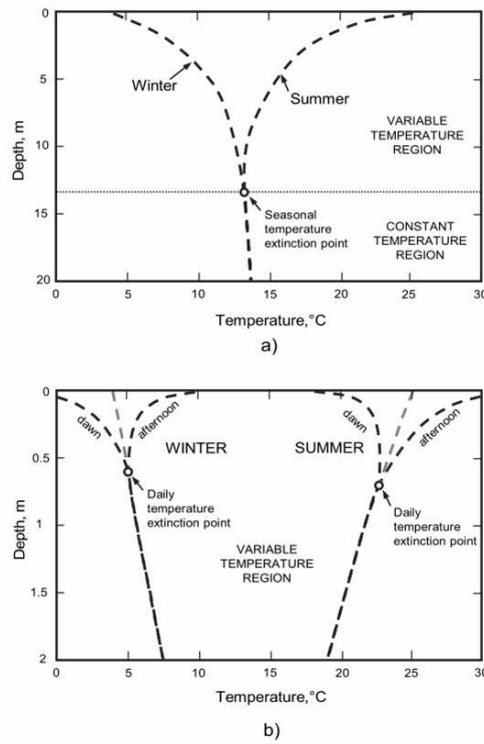


FIGURE 3.3.1: Représentation des comportements thermiques journaliers (a) et saisonniers (b) du sol (extrait de Porras Velásquez, 2007)

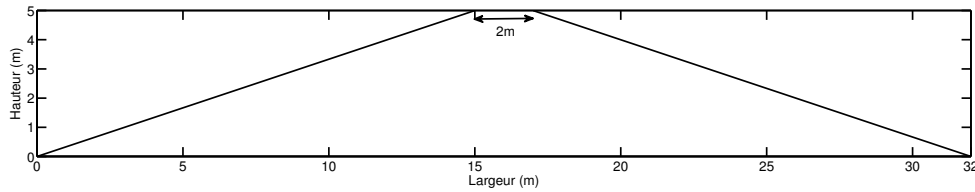


FIGURE 3.4.1: Géométrie de la digue simulée

une charge hydraulique permanente de 3 m. Quant aux charges thermiques, la digue simulée subit les influences de la température de l'eau et de l'air.

La résolution du problème thermo-hydraulique vise à connaître à chaque instant le champ de température à l'intérieur de l'ouvrage. Cette résolution passe par la définition d'un modèle hydraulique et d'un modèle thermique.

3.4.1 Modèle hydraulique

3.4.1.1 Conditions aux limites

La digue simulée est soumise à une charge d'eau permanente h_w de 3m : une condition de Dirichlet est imposée sur le talus immergé de la digue (Fig. 3.4.2). La fondation de l'ouvrage est supposée imperméable. Le flux de charge de pression à travers la base de la digue est donc nulle : $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$ (condition de Neumann). Cette condition est également employée pour

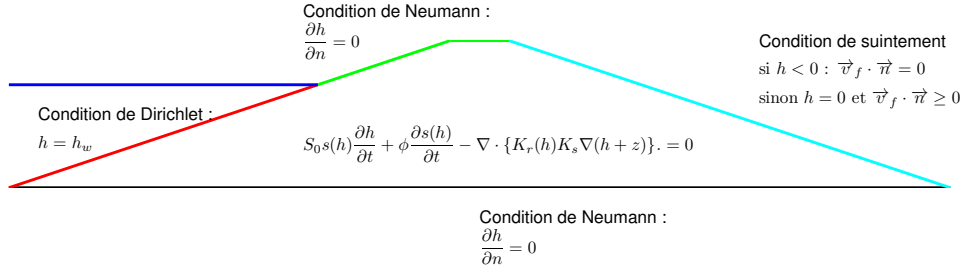


FIGURE 3.4.2: Schéma explicatif du modèle hydraulique : équation utilisée pour le calcul de la charge de pression h dans le domaine de calcul (l'ouvrage hydraulique modélisé) et conditions aux limites aux frontières du domaine de calcul (à chaque condition aux limites différentes correspond une couleur). n représente la normale à la frontière considérée.

la crête de digue et la section du talus aval non immergée. Enfin, pour le talus aval, une condition de suintement, aussi appelée condition de Signorini (Sochala (2008)), est imposée. Concrètement, la condition de suintement modélise le ruissellement de l'eau le long du talus aval.

3.4.1.2 Équation d'écoulement

Pour calculer la distribution de la charge de pression à l'intérieur de la digue simulée, l'équation de Richards, telle que formulée précédemment (Eq. 3.1.16), est utilisée (Fig. 3.4.2). Concernant les courbes caractéristiques du sol (§3.1.2.2), $K(\theta)$ et $h(\theta)$, le modèle de Van-Genuchten est choisi.

L'équation est discrétisée aux éléments finis pour la résolution du problème hydraulique avec les conditions aux limites définies précédemment. Du fait que la charge hydraulique imposée est constante, le calcul fournit la distribution de charge hydraulique en régime permanent.

3.4.1.3 Valeurs des paramètres hydrauliques

Treize simulations numériques ont été menées. L'objectif de ces simulations est d'obtenir des signaux de température relatifs à différentes vitesses d'écoulement au sein de la digue simulée. Entre les différentes simulations, seul un paramètre, la conductivité hydraulique horizontale à saturation, notée $K_{s,h}$ ³, a été changée pour obtenir des champs de vitesses d'écoulement variables, d'une simulation à l'autre. $K_{s,h}$ choisies s'échelonnent entre $5 \cdot 10^{-2}$ m/s et 10^{-7} m/s. Elles permettent de reproduire des champs de vitesses élevées (vitesses autour de 10^{-3} m/s) et très faibles (vitesses autour de $5 \cdot 10^{-9}$ m/s). Les valeurs de la conductivité hydraulique verticale à saturation, notée $K_{s,v}$, ont été calculées à partir de $K_{s,h}$: une anisotropie de conductivité hydraulique de 100 a été considérée $\frac{K_{s,h}}{K_{s,v}} = 100$. Ce choix signifie que l'on considère le matériau 100 fois plus perméable aux écoulements horizontaux que verticaux⁴.

3. $K_{s,h}$ est la composante horizontale du tenseur de conductivité hydraulique à saturation (Eq. 3.1.10).

4. Cette anisotropie de perméabilité se retrouve sur le terrain. Les ouvrages en terre sont généralement construits par couches successives compactées les unes sur les autres. Du fait de cette conception, la perméabilité verticale est plus faible que la perméabilité horizontale.

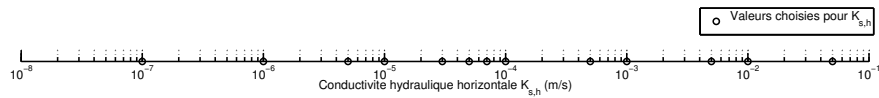


FIGURE 3.4.3: Valeurs de conductivité hydraulique horizontale à saturation choisie pour chacune des 13 simulations

Conductivité hydraulique horizontale à saturation $K_{s,h}$	$[m.s^{-1}]$	entre $10^{-7} ms^{-1}$ et $5 \cdot 10^{-2} ms^{-1}$
Anisotropie de conductivité hydraulique $\frac{K_{s,h}}{K_{s,v}}$	-	100
Compressibilité de stockage S_0	$[m^{-1}]$	10^{-4}
Porosité ϕ	-	0,3
Saturation résiduelle	-	0,223
Saturation maximale	-	1
Paramètre α	-	2
Paramètre n	-	1,41

TABLE 3.1: Valeurs des paramètres du modèle hydraulique choisies pour les 13 simulations

Pour la porosité, une valeur de 0,3 a été choisie. Enfin, pour les paramètres du modèle de Van-Genuchten, des valeurs issues de la littérature (Carsel et Parrish, 1988) et correspondant à un sol de type limon ont été utilisées (Tab. 3.1).

Les valeurs des paramètres utilisés pour le modèle hydraulique sont récapitulés dans le tableau Tab.3.1.

3.4.1.4 Champ de charge de pression

Le champ de charge de pression obtenu est identique pour les 13 simulations, une représentation de ce champ est donnée Fig. 3.4.4Haut. Un point d'observation, appelé par la suite capteur, a été choisi sous le talus aval et la ligne d'eau. Il est situé à une profondeur d'environ $1m^5$. La distribution du gradient hydraulique le long de l'horizontale⁶ passant par le capteur est quasi-linéaire (Fig. 3.4.4Bas). Le long de cette ligne d'observation, le gradient hydraulique varie faiblement : il est compris entre 0,06 et 0,072. Par la suite, la valeur moyenne du gradient hydraulique (0,065) sera retenue.

3.4.2 Modèle thermique

3.4.2.1 Conditions aux limites

Deux charges thermiques variables au cours du temps sont imposées à la digue simulée : la température de l'air et la température de l'eau. Nous avons choisi d'utiliser les données de

5. Ce choix de position (pied de talus aval) a été fait sur plusieurs sites d'étude dont les deux étudiés par la suite au chapitre 5 et 6

6. Une droite horizontale a été choisie car la composante verticale de la vitesse d'écoulement est très faible devant la composante horizontale : du fait de l'anisotropie de perméabilité, il y a un rapport de 100.

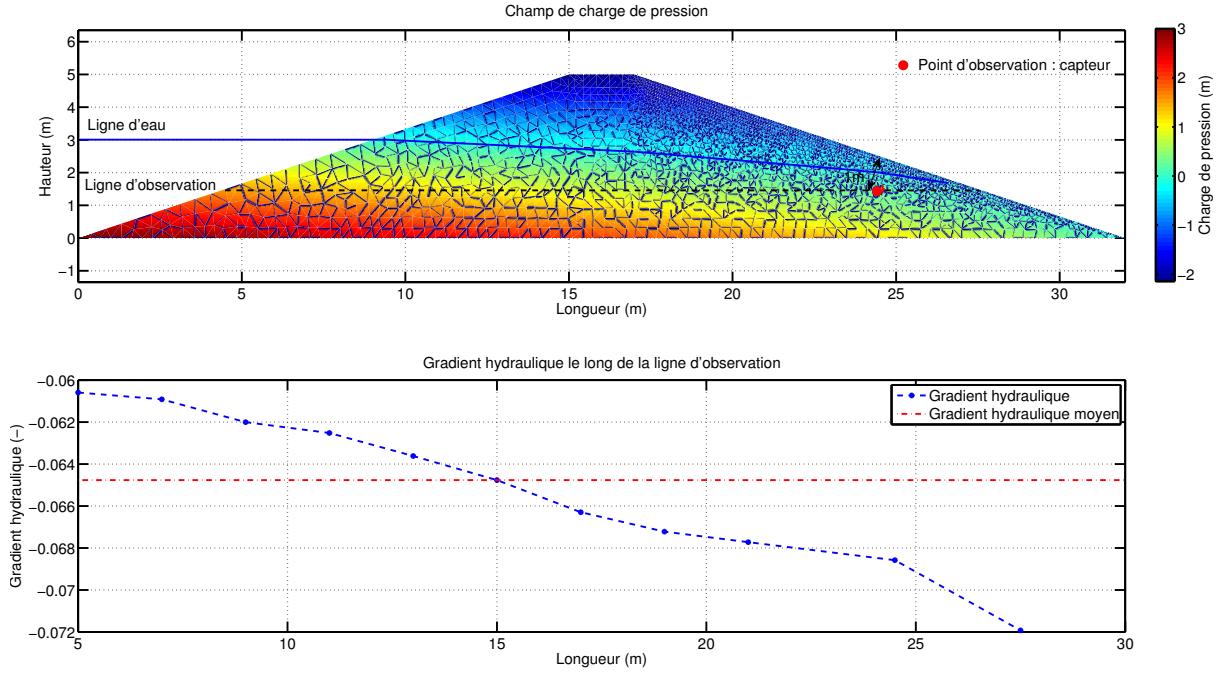


FIGURE 3.4.4: Haut : Champ de charge de pression dans la digue simulée
Bas : Gradient hydraulique le long d'une ligne d'observation horizontale passant par le point d'observation (appelé capteur)

température d'air et d'eau mesurées à un pas horaire sur le site de Kembs que nous étudierons au chapitre 6⁷.

L'échange thermique entre l'air et la surface de la digue en contact avec l'air est supposé imparfait (Fig. 3.4.6) : le flux de chaleur échangé est pondéré par un coefficient de conduction-convection. La condition aux limites exprimant les échanges avec la température de l'air, s'écrit sous la forme d'une condition de Cauchy : $\lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T_{air} - T)$, T étant la température de la digue au point considéré.

Côté amont, l'échange thermique entre l'eau et la partie immergée de la digue est supposée parfait : sur la frontière en contact avec l'eau, la température est prise égale à celle de l'eau (condition de Dirichlet).

Enfin, sur la base de la digue, les échanges sont considérés adiabatiques : le flux de chaleur est nul (condition de Neumann), le flux géothermique n'est pas pris en compte.

3.4.2.2 Équation de transfert thermique

L'équation d'advection-diffusion en 2D présentée précédemment (Eq. 3.2.5) est utilisée pour calculer le champ de température de la digue simulée. Précisons que les effets dispersifs sont pris en compte dans la modélisation : le tenseur de conductivité thermique totale, λ_T , comporte un terme relatif à la conduction et un autre relatif aux effets de dispersion. Une

7. Des informations complémentaires sur ces mesures sont apportées au chapitre 6

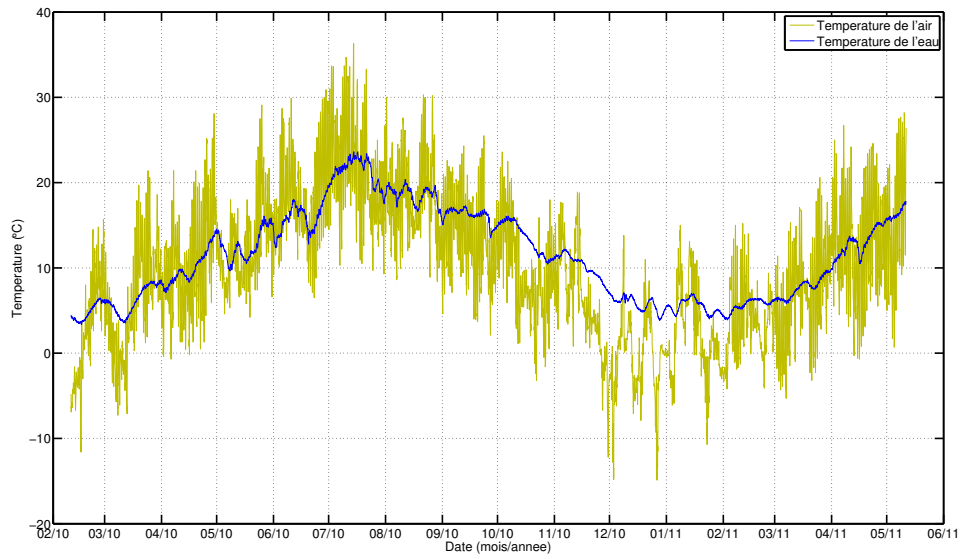


FIGURE 3.4.5: Température de l'air et de l'eau mesurée sur le site de Kembs de février 2010 à mai 2011

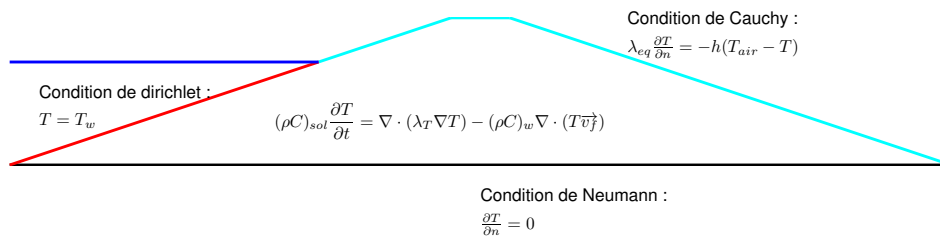


FIGURE 3.4.6: Schéma explicatif du modèle thermique : équation utilisée pour le calcul de la température T dans le domaine de calcul (l'ouvrage hydraulique modélisé) et conditions aux limites aux frontières du domaine de calcul (à chaque condition différente correspond une couleur différente)

expression identique à celle exprimée précédemment (Eq. 3.2.4) est utilisée pour ce tenseur. L'équation d'advection-diffusion est discrétisée aux éléments finis pour la résolution du problème thermique avec les conditions aux limites définies précédemment. Le terme d'advection fait apparaître la vitesse d'écoulement à l'intérieur de la digue. Le champ de vitesses calculé précédemment avec le modèle hydraulique est utilisé.

3.4.2.3 Valeurs des paramètres thermiques

Pour chacune des 13 simulations, les mêmes paramètres thermiques ont été utilisés. Ils proviennent de la littérature (Côté et Konrad (2005)) et correspondent à un sol de type limon (Tab. 3.2).

Capacité calorifique volumique du sol $(\rho c_p)_{sol}$	$[\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}]$	$(\rho c_p)_{sol} = (1 - \phi) \cdot (\rho c_p)_s + \phi \cdot (\rho c_p)_w$
Tenseur de conductivité thermique λ_T	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	$\lambda_{T_{ij}} = \lambda_{eq} \delta_{ij} + (\rho c_p)_w \left[\alpha_T v_D \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_{D,i} v_{D,j}}{ v_D } \right]$
Conductivité thermique équivalente du sol λ_{eq}	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	$\lambda_{eq} = (1 - \phi) \lambda_s + \lambda_w$

(a)

Capacité calorifique volumique de la matrice solide $(\rho c_p)_s$	$[\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}]$	$2 \cdot 10^{-6}$
Capacité calorifique volumique de l'eau $(\rho c_p)_w$	$[\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}]$	$4,68 \cdot 10^{-6}$
Conductivité thermique de la matrice solide λ_s	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	2
Conductivité thermique de l'eau λ_w	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	0,6
Dispersivité transversale α_T	[m]	0,2
Dispersivité longitudinale α_L	[m]	0,02
Coefficient de conducto-convection h	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	10

(b)

TABLE 3.2: (a) Rappel de l'expression des paramètres thermiques

(b) Valeurs des paramètres thermiques

3.4.2.4 Description des signaux de température obtenus au capteur : le jeu de données simulées

Les signaux de température obtenus au capteur pour chacune des 13 simulations, constituant le jeu de données simulées, permettront de tester les modèles de caractérisation de fuite présentés dans le chapitre suivant. Au préalable, nous allons donner une description physiques du jeu de données simulées.

Suivant les vitesses d'écoulement, fortes, moyennes ou faibles, la forme des signaux de température, caractérisée par leur amplitude et leur phase, varie (Fig. 3.4.7). Lorsque la vitesse est rapide, les transferts par convection dominant et le signal au capteur est proche de celui de l'eau. En revanche, pour des vitesses plus faibles, le signal apparaît atténué et déphasé.

Pour poursuivre l'analyse, l'amplitude annuelle des signaux de température au capteur ainsi que leur déphasage par rapport à la température de l'eau ou de l'air ont été étudiés (Fig. 3.4.9). Pour estimer le déphasage, la tendance saisonnière des signaux a été calculée : une fonction sinusoïdale a été identifiée aux signaux de température à l'aide d'un critère aux moindres carrés. Ensuite, le déphasage est calculé entre les tendances sinusoïdales (Fig. 3.4.8).

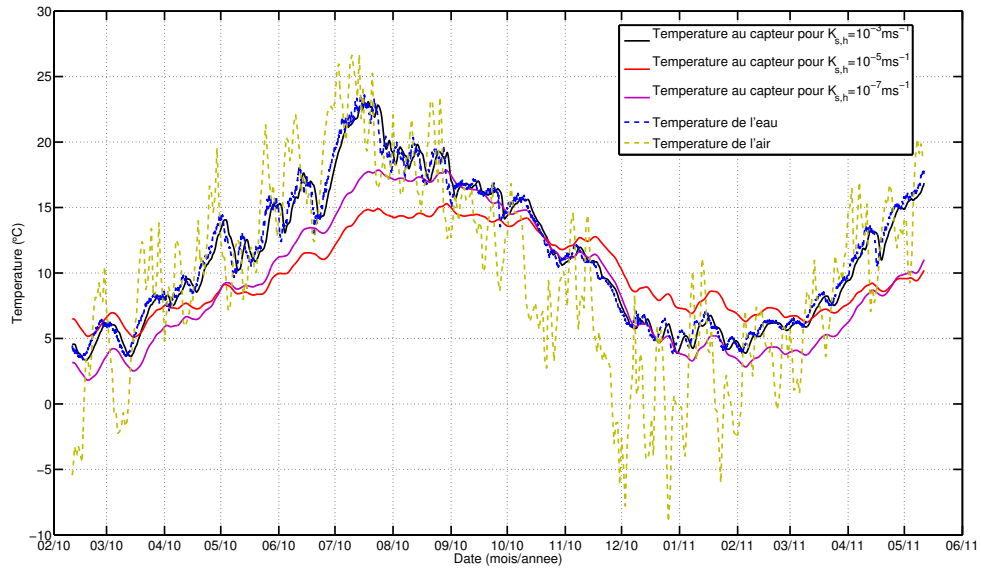


FIGURE 3.4.7: Signaux de température obtenues pour différentes valeurs de $K_{s,h}$ comparés aux signaux de température de l'air et de l'eau. Les signaux au capteur illustrent différentes intensités d'écoulement : $K_{s,h} = 10^{-3} \text{ ms}^{-1} \Rightarrow$ vitesse forte ; $K_{s,h} = 10^{-5} \text{ ms}^{-1} \Rightarrow$ vitesse moyenne ; $K_{s,h} = 10^{-7} \text{ ms}^{-1} \Rightarrow$ vitesse faible

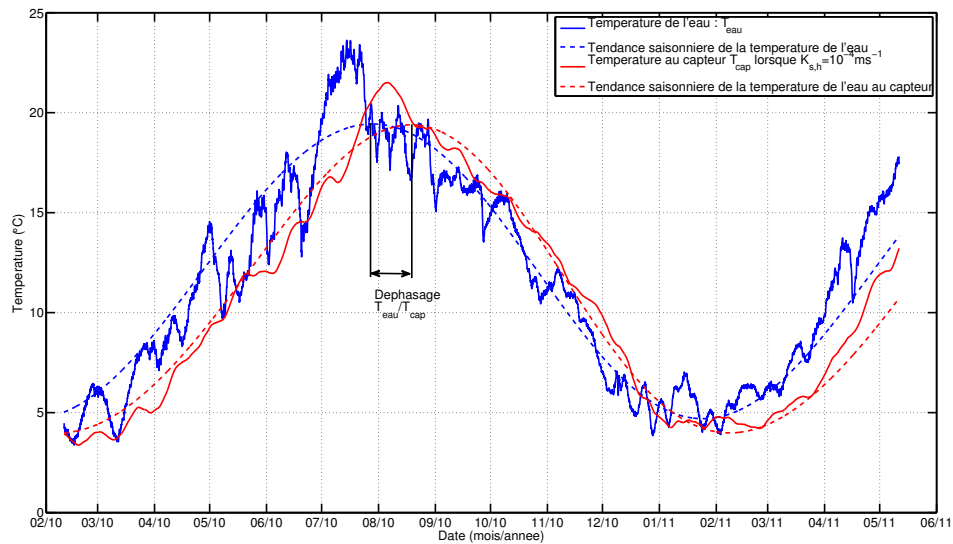


FIGURE 3.4.8: Estimation du déphasage entre la température de l'eau et la température au capteur lorsque $K_{s,h} = 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ par calcul du déphasage entre les tendances saisonnières respectives à chaque signal

Les amplitudes et déphasages calculés ont été confrontés au nombre de Péclet Pe (§3.2.1.3).

Trois plages de perméabilité ont pu être identifiées (Fig. 3.4.9) :

- dans la première plage de $K_{s,h} = 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$ à $K_{s,h} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$, qui correspond à des faibles vitesses d'écoulement, Pe est compris entre 0,2 et 10. Cet encadrement du Péclet indique que les phénomènes de conduction l'emportent sur les phénomènes de convection. Du fait de la position du capteur, l'influence de la température de l'air est majoritaire dans cette plage. Lorsque la perméabilité augmente, et donc la vitesse d'écoulement, la sensibilité à la température de l'air diminue : l'amplitude annuelle de température diminue légèrement. Le déphasage n'est que très faiblement affecté.
- dans la deuxième plage de $K_{s,h} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ à $K_{s,h} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$, $10 \leq Pe \leq 70$: c'est une zone de transition dans laquelle les phénomènes de conduction et de convection sont d'influences similaires. Dans cette plage, on constate une diminution suivie d'une augmentation de l'amplitude annuelle lorsque $K_{s,h}$ augmente. Quant au déphasage, il augmente significativement. Dans cette zone de transition, l'influence majoritaire glisse progressivement de la température de l'air vers la température de l'eau quand $K_{s,h}$ et donc la vitesse d'écoulement augmente.
- dans la troisième plage de $K_{s,h} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ à $K_{s,h} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$, $Pe \geq 70$: les phénomènes de convection l'emportent sur les phénomènes de conduction. Dans cette plage, l'influence de l'eau prédomine. Plus $K_{s,h}$ augmente et plus l'amplitude augmente, tendant vers la valeur asymptotique égale à l'amplitude annuelle de la température de l'eau : plus la vitesse augmente et moins la température de l'eau est amortie. Le déphasage suit une évolution inversée mais se comporte de manière analogue : plus $K_{s,h}$ augmente et plus le déphasage diminue, tendant également vers une valeur asymptotique qui est le déphasage nul avec le signal de température de l'eau.

Cette étude physique du jeu de données simulées, obtenu par simulation numérique d'une digue homogène, donne un premier aperçu des effets de la vitesse d'écoulement sur la température de l'ouvrage.

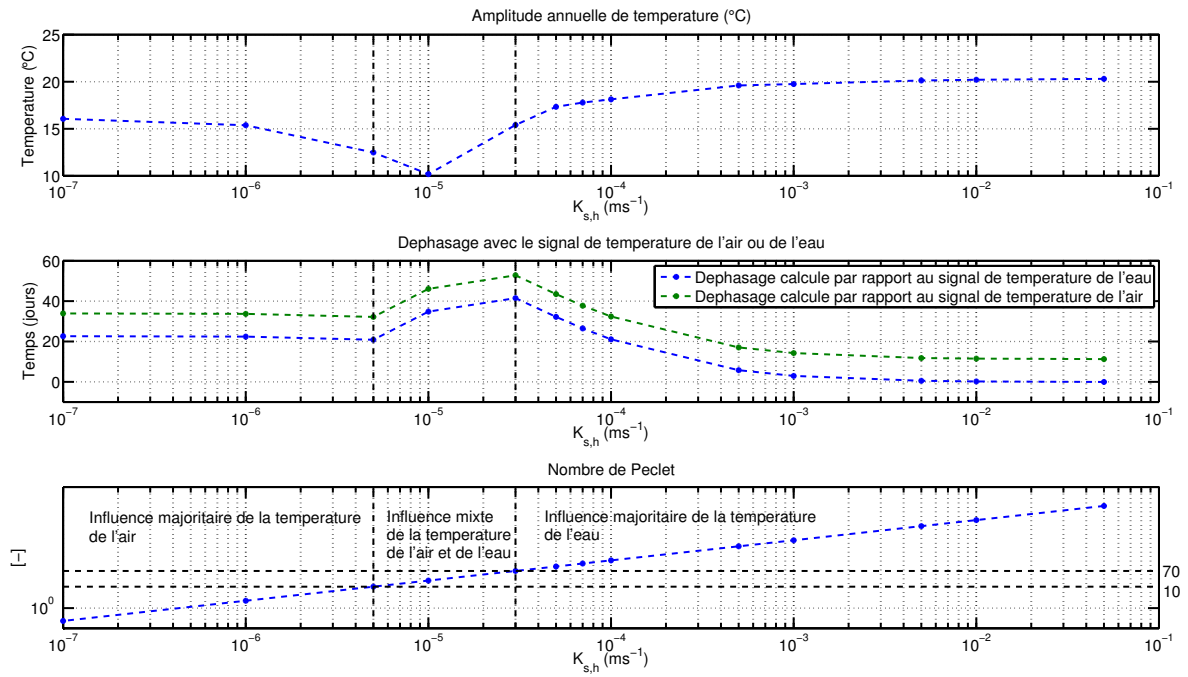


FIGURE 3.4.9: Variation des influences thermiques extérieures au niveau du capteur en fonction de la conductivité hydraulique horizontale à saturation $K_{s,h}$ et donc de la vitesse d'écoulement, effets sur l'amplitude et la phase des signaux mesurés au capteur

Haut : Amplitude annuelle de température au capteur

Milieu : Déphasage entre le signal de température au capteur et celui de température de l'air ou de l'eau

Bas : Nombre de Péclet calculé pour chaque simulation

Conclusion

Les écoulements lents à travers le sol, présenté comme milieu poreux, obéissent à la loi de Darcy, valable en sol saturé ou non. Cette loi, couplée à l'équation de continuité, a permis d'établir l'équation de Richards qui donne accès au champ de vitesses dans le milieu poreux. Cette donnée est nécessaire lorsque l'on s'intéresse aux transferts thermiques à l'intérieur du sol.

Une partie des transferts thermiques se fait par conduction, i.e. par transfert d'agitation thermique de proche en proche, et une autre partie par convection : l'énergie thermique est transportée par un fluide. Dans le sol, ce fluide est l'eau. Dès lors, la dépendance des transferts thermiques à la vitesse d'écoulement est claire : pour calculer le champ thermique, il faut connaître le champ de vitesses. L'équation d'advection-diffusion établit le champ de température dans le sol en fonction des transferts par convection et par diffusion. Le terme d'advection de cette équation fait apparaître la vitesse et exprime le lien avec l'équation de Richards : les problèmes thermiques et hydrauliques sont couplés.

Les conditions aux limites du problème thermique dépendent en partie des échanges avec l'extérieur. Ces échanges se produisent majoritairement, soit par rayonnement, soit par transfert de chaleur avec l'atmosphère (convection et évaporation). Le caractère périodique de ces influences extérieures se retrouve sur le champ de température dans le sol.

La résolution d'un problème thermo-hydraulique peut se faire numériquement. Un modèle en 2D aux éléments finis des transferts thermo-hydrauliques à travers un ouvrage hydraulique de géométrie simple a été établi. Il a permis d'obtenir des données de température pour différentes vitesses d'écoulement. Précisons que les effets 3D, perceptibles sur des écoulements de fuites réels, ne sont pas pris en compte ici. Les données obtenues, qui constituent le jeu de données simulées, permettront de tester les modèles de caractérisation de fuite présentés au chapitre suivant.

Méthodes de caractérisation des fuites utilisées et application sur des données simulées

Ce chapitre est gardé confidentiel par souhait d'EDF, financeur de ce travail de doctorat réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE.

Test des modèles de caractérisation de fuites sur des données semi-contrôlées issues de la plateforme expérimentale PEERINE

Les méthodes de caractérisation de fuite par mesures de température ont été présentées au chapitre précédent. Ces méthodes ont été testées sur des données issues de simulations numériques. Dans ce chapitre, nous proposons d'évaluer de nouveau ces méthodes mais cette fois-ci sur des données issues d'un modèle physique. Le modèle physique reproduit à petite échelle une digue en charge. Cette plateforme expérimentale a été construite en 2006 pour tester des dispositifs de détection de fuite par mesure de température, que ce soit derrière un masque amont ou à travers un remblai. Elle dispose de plusieurs zones de fuites artificielles dont le débit peut être contrôlé et intègre un réseau de capteur de température par fibre optique. A partir d'un programme expérimental établi au cours de la présente étude, des séries de température dans le sol ont été obtenues et vont permettre l'évaluation des méthodes de caractérisation.

Après une description de la plateforme et du programme expérimental, les résultats des méthodes de caractérisation des fuites seront présentés.

5.1 Description de la plateforme expérimentale PEERINE

5.1.1 Conception de la plateforme

La plateforme expérimentale PEERINE (Plateforme Expérimentale pour l'Erosion Interne et les Ecoulements) a été construite en 2006, sur le site du Cemagref d'Aix en Provence, dans le but de tester un système de détection de fuite à travers un remblai basé sur la mesure de température par fibre optique.

Elle comporte quatre digues de 2,80 m de hauteur qui forment un bassin rectangulaire d'une dimension de 36 m par 28 m en pied (Fig. 5.1.1b-a). Le corps de digue est constitué d'un matériau très peu perméable, un limon argileux de conductivité hydraulique à saturation de 10^{-11} m/s. Sur côté aval du corps de digue, une recharge en gravier a été apposée.

Entre la recharge et le corps de digue, deux géotextiles ont été insérés. Le premier joue le rôle de filtre et intègre les capteurs thermiques : des fibres optiques sont agrafées dessus. Ces fibres constituent le dispositif de détection aval. Le second géotextile occupe un rôle de protection des fibres optiques, et renforce la filtration. Les digues seront nommées en fonction de leur orientation cardinale (Est, Sud, Ouest et Nord).

Les digues comprennent sept zones de fuites artificielles qui traversent l'ouvrage (Fig. 5.1.1b-b). Ces zones de fuite, de formes parallélipédiques sont constituées de sable. Leur conductivité hydraulique à saturation, de l'ordre de 10^{-3} m/s, est forte par rapport à celle du corps de digue. Un géotextile sépare la zone de sable, du corps de digue en argile limoneux. L'épaisseur des zones de fuites varient entre 20 cm et 30 cm. Elles ont été placées à deux hauteurs différentes par rapport au fond du bassin : les fuites en « Position basse » sont situées à 20 cm au-dessus du fond du bassin et les fuites en « Position haute », à 1,50 m du fond. A l'aval des zones de fuite, un tuyau en PVC muni d'une vanne assure l'alimentation en eau. Les trois zones de fuites que nous utiliserons, REH, RWH et RWB, sont désignées en fonction de leur situation (faces Est, 'E', Ouest, 'W') et de leur hauteur (haute H, basse B). La lettre R rappelle que ces fuites sont à travers le remblai (Fig. 5.1.1b-b).

(a) Photographie de la plateforme expérimentale PEERINE

(b) Vue en plan de PEERINE, position des fuites à travers le remblai et notamment celles utilisées : REH, RWH et RWB. Les dimensions de chaque zone de fuite sont indiquées à côté de leur symbole.

En 2008, la plateforme a été modifiée pour étudier la détection de fuites sous un masque amont. Un dispositif d'étanchéité amont par géomembrane (DEG) a été intégré. Un tel dispositif assure deux fonctions. La première est d'assurer l'étanchéité. La seconde est de permettre le drainage des éventuelles fuites en cas de dysfonctionnement de la barrière d'étanchéité. Sur la plateforme PEERINE, une géomembrane a été disposée pour assurer l'étanchéité (Fig. 5.1.3). Un géotextile de protection a été disposé au-dessus et en-dessous de la géomembrane pour la prémunir de toute agression mécanique. Toujours dans un rôle de protection, des dalles en béton ont été ajoutées au-dessus du géotextile. Pour le drainage, deux solutions ont été mises en œuvre :

- sur la digue Est, un géo-espaceur de drainage,
- sur la digue Ouest, un tapis granulaire de 30 cm d'épaisseur.

Des fibres optiques ont été insérées juste en-dessous du dispositif de drainage. Ces capteurs constituent le dispositif de détection amont.

Pour reproduire des fuites à travers le DEG, des trous ont été faits depuis la face amont du DEG, à travers la géomembrane et jusqu'à la couche drainante. Un tuyau en PVC alimente ces fuites artificielles. Au total, huit fuites artificielles à travers le masque amont ont ainsi été réalisées et ont été réparties sur les faces Est et Ouest du bassin (Fig. 5.1.2). Ces fuites sont placées à différentes hauteurs :

- en position « basse » : à 50 cm au-dessus du fond du bassin,
- en position « mi-hauteur » (« M ») : à 1,50 m au-dessus du fond du bassin,
- en position « haute » (« H ») : à 1,95 m au-dessus du fond du bassin.

Les trois fuites qui ont été utilisées dans cette étude, GEM, GEH et GWM, sont désignées en fonction de leur situation (face Est, « E » ou Ouest, « W ») et de leur hauteur (moyenne « M » ou haute « H »). La lettre « G » rappelle que ces fuites sont à travers la géomembrane.

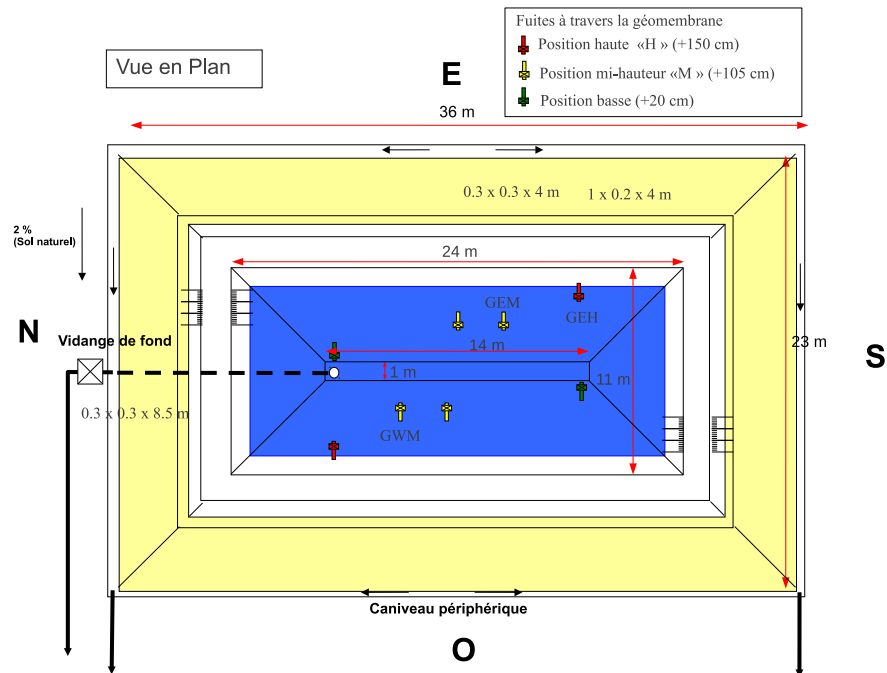


FIGURE 5.1.2: Vue en plan de la plateforme expérimentale PEERINE, position des fuites à travers la géomembrane et notamment des 3 fuites utilisées : GEM, GEH et GWM.

5.1.2 Fonctionnement hydraulique du bassin

Les fuites à travers le remblai comme celles à travers le masque amont sont alimentées en eau par l'intermédiaire d'un tuyau souple. L'eau injectée dans les zones de fuites ne provient pas directement du bassin mais d'un réservoir situé à une dizaine de mètres au-dessus du bassin. Pour que la température de l'eau injectée soit homogène à celle du bassin, le tuyau d'injection serpente dans celui-ci. Le réservoir extérieur a un double rôle : il permet d'alimenter les différentes zones de fuites et il assure l'alimentation continue du bassin. La hauteur d'eau dans le bassin est régulée à une hauteur constante fixée à 2,15 m grâce à un dispositif de trop-plein. Le débit d'alimentation des fuites est réglé manuellement par une vanne et contrôlé par un débitmètre.

5.1.3 Description du dispositif de mesures

5.1.3.1 Dispositif de mesures par fibre optique

Dispositif de détection amont Le dispositif de détection amont est constitué par un ensemble de fibres optiques placées sous le dispositif de drainage (Fig. 5.1.3). Les fibres optiques constituent les capteurs thermiques. Les câbles de fibres optiques parcourent le périmètre intérieur du bassin. Ils ont été placés à deux hauteurs différentes :

- un câble a été placé au fond du bassin entre 5 cm et 10 cm au-dessus du fond du bassin,

5. TEST DES MODÈLES DE CARACTÉRISATION DE FUITES SUR DES DONNÉES SEMI-CONTRÔLÉES ISSUES DE LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE PEERINE

- un autre est situé à un niveau intermédiaire, appelé « niveau intermédiaire », entre 80 cm et 90 cm au-dessus du fond du bassin. Nous appellerons « SI » l'ensemble des capteurs thermiques Sous le masque amont et situé au « niveau Intermédiaire ». Seules les données de température provenant de SI seront exploitées dans cette étude.

Les câbles optiques utilisés contiennent des fibres optiques multimodes et sont associés à des câbles en cuivre utiles pour la méthode de chauffe. Dans notre étude, seules des mesures passives, i.e. les mesures naturelles de la température du sol, sans chauffe du câble optique, ont été réalisées.

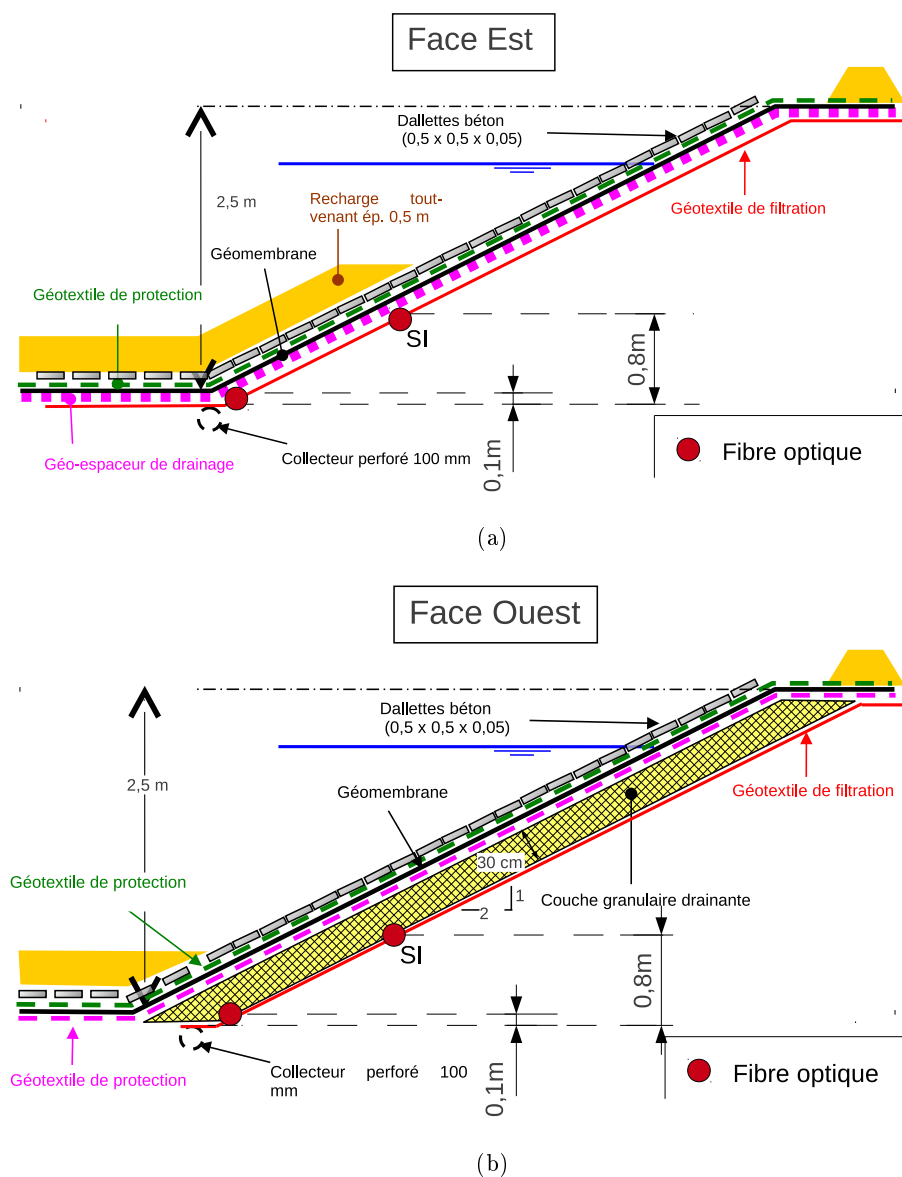


FIGURE 5.1.3: Vue en coupe du dispositif d'étanchéité par géomembrane de la face Est (a) et de la face Ouest (b), position des fibres optiques et notamment de celle exploitée dans cette étude : SI.

Dispositif de détection aval Le dispositif de détection aval est constitué d'un ensemble de fibres optiques placées sur un géotextile situé entre la recharge aval et le corps de digue (Fig. 5.1.4). Ces fibres constituent les capteurs thermiques. Les câbles de fibre optique parcourent le périmètre extérieur du bassin à trois hauteurs différentes. Un câble est situé en crête de digue, à 1,90 m au-dessus du pied de digue. A l'origine, ce câble a été installé de manière à obtenir des mesures de référence. Un autre câble est placé au milieu du talus aval (niveau moyen « M »), à 90 cm au-dessus du pied de digue. Enfin, le dernier câble est placé en pied de talus aval (niveau bas « B »).

Dans cette étude, nous exploiterons les données de température des câbles situés aux niveaux moyen et bas. Nous nommerons :

- « MW » et « ME », les capteurs du câble au niveau moyen situés respectivement en face Ouest et Est
- « BW » et « BE », les capteurs du câble au niveau bas situés respectivement en face Ouest et Est

Les câbles utilisés sont différents des câbles amont. Leur renforcement est plus léger, ils ne contiennent pas de fils de cuivre destinés à la méthode de chauffe. Les fibres optiques sont également des fibres multimodes.

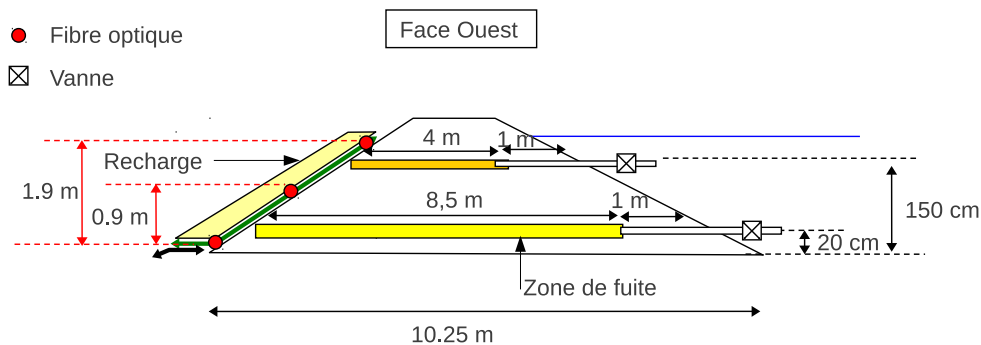


FIGURE 5.1.4: Vue en coupe de la digue ouest de la plateforme expérimentale PEERINE, DEG non schématisé.

Appareil optoélectronique et performance de la mesure Les mesures de température par fibre optique ont été réalisées à l'aide d'un appareil du commerce de type Sensornet. Une durée d'acquisition de cinq minutes a été choisie avec une acquisition toutes les heures.

Les fibres optiques constituant le dispositif de détection amont sont soudées en série les unes aux autres. La longueur totale de cette installation optique est d'environ 1100 m. Aux deux extrémités, à 0 m et à 1100m, la fibre optique mesure la température du même point (local où se situe l'appareil optoélectronique). L'influence de la distance séparant le point étudié de l'appareil optoélectronique peut donc être étudiée. A priori, plus la distance est importante et plus la mesure est dégradée (Fig. 2.2.7). Sur une durée d'environ 40 jours,

l'écart moyen entre les deux mesures était d'environ $0,04^{\circ}\text{C}$ avec un écart type d'environ $0,07^{\circ}\text{C}$ (Fig. 5.1.5).

De cette analyse, on en déduit que la précision des températures mesurées à l'aide de la fibre optique est comprise entre plus ou moins $0,07^{\circ}\text{C}$.

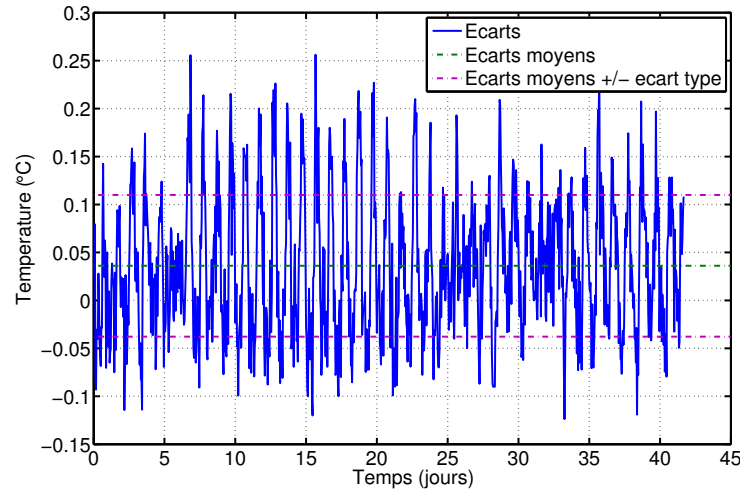


FIGURE 5.1.5: Pour un point donné, écarts entre la température mesurée après 0 m et après 1100m de fibre optique

5.1.3.2 Dispositif de mesures annexes

Autres mesures de température Durant les campagnes d'essai, d'autres données de température ont été mesurées à l'aide de sondes PT100 : la température de l'air, la température de l'eau au fond et en surface du bassin ainsi que la température de l'eau injectée. Cette dernière a été mesurée à l'intérieur du tuyau d'injection en PVC de la fuite GEH. D'une part, ces mesures de température permettent d'avoir un aperçu des influences thermiques s'exerçant sur la plateforme. D'autre part, certaines mesures (la température de l'eau et de l'air) sont nécessaires pour l'application de MORITO.

Mesures de débit Le débit à l'entrée de la zone de fuite, appelé débit injecté, a été mesuré en continu à l'aide d'un débitmètre électromagnétique. Le débit sortant des zones de fuites, appelé débit sortant, est collecté par un drain pour les fuites à travers le masque amont et par des caniveaux pour les fuites à travers le remblai. Seule une mesure du débit total sortant des fuites à travers le masque amont est disponible. Il en est de même pour les fuites à travers le remblai. Au cours des campagnes d'essais, des mesures manuelles ont été réalisées de manière ponctuelles.

5.2 Programmes expérimentaux

Les différents programmes expérimentaux, qu'ils concernent les fuites à travers la géomembrane ou les fuites à travers le remblai, ont consisté à réaliser un suivi thermique des digues à l'aide des fibres optiques tandis que des débits constants, par paliers successifs, étaient injectés dans les fuites artificielles. L'objectif est d'observer l'influence des variations de vitesse de fuites sur les températures mesurées.

Deux programmes expérimentaux ont été menés. L'un concerne les fuites à travers le masque amont, appelé programme amont, l'autre concerne les fuites à travers le remblai, appelé programme aval.

5.2.1 Programme amont

Trois fuites artificielles à travers le masque amont ont été activées : deux en face Est, GEM à mi-hauteur et GEH, en position haute et une en face Ouest, GWM à mi-hauteur. Au cours de la campagne d'essai, différents débits ont été injectés par paliers dans chacune des zones de fuites artificielles (Tab. 5.1). Les paliers de débit, au nombre de quatre, étaient croissants pour GEM et GWM et décroissants pour GEH. Une évolution décroissante de débit a été choisie pour GEH de manière à ce que le débit total injecté ne dépasse pas le débit maximal disponible du réservoir. La gamme de débit injecté est comprise entre 0,5 l/min et 4 l/min.

La durée de chaque palier varie entre 20 jours et 30 jours. Ces différences de durée sont liées à des problèmes organisationnels.

	GEM (l/min)	GEH (l/min)	GWM (l/min)
du 01/09/09 au 20/09/09	0,5	4	0,5
du 20/09/09 au 14/10/09	1	3	1
du 14/10/09 au 04/11/09	1,5	2	1,5
du 04/11/09 au 04/12/09	0	1	3
du 04/12/09 au 04/01/10	0	0	0

TABLE 5.1: Paliers de débit imposés sur les fuites à travers le DEG : GEM, GEH et GWM

5.2.2 Programme aval

Trois fuites à travers le remblai ont été testées : une fuite en face Est, REH, en position haute, et deux fuites en face ouest, RWB, en position basse et RWH en position haute.

REH		RWB		RWH	
Dates	Débit (l/min)	Dates	Débit (l/min)	Dates	Débit (l/min)
05/12/09 au 07/01/10	0,5	05/11/09 au 14/12/09	0,5	05/12/09 au 07/01/10	7
07/01/10 au 08/02/10	1	14/12/09 au 23/01/10	1	07/01/10 au 08/02/10	4
08/02/10 au 12/03/10	2	23/01/10 au 04/03/10	4	08/02/10 au 12/03/10	1
12/03/10 au 13/04/10	4	04/03/10 au 13/04/10	7	12/03/10 au 13/04/10	0,5

TABLE 5.2: Paliers de débit imposés sur les fuites à travers le remblai : REH, RWB et RWH

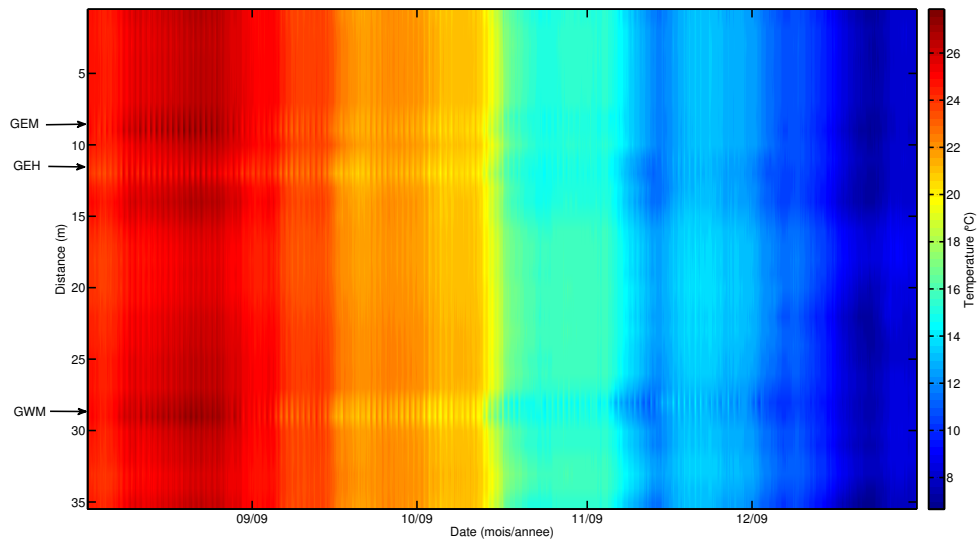
5.3 Analyse des données amont

5.3.1 Aperçu des données brutes

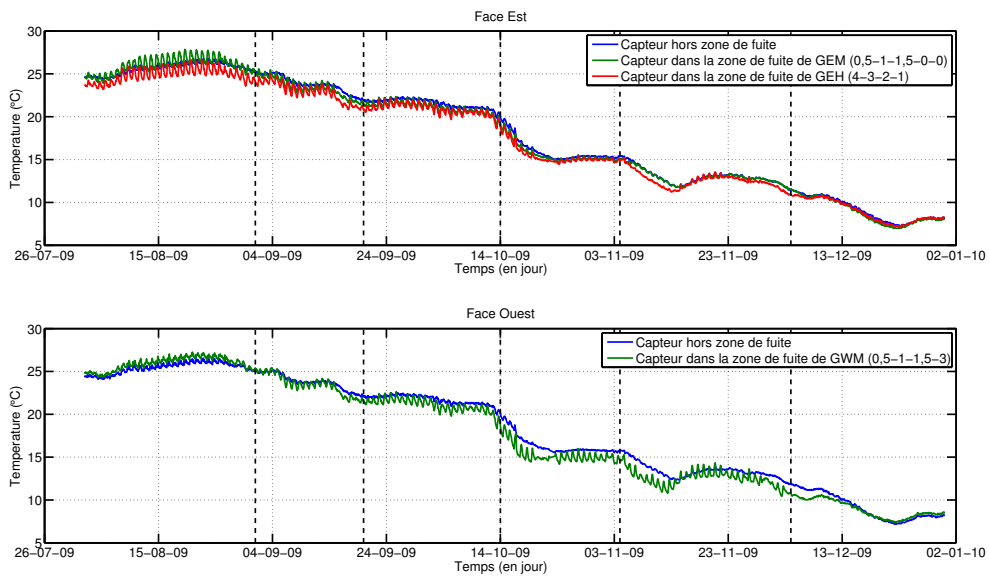
Pour donner un aperçu des mesures des capteurs de SI (fibre placée sous le masque à hauteur intermédiaire) sur toute la période de la campagne d'essai, les données sont représentées sous forme d'image (Fig. 5.3.1a). Un code couleur est utilisé pour représenter les variations de la température en fonction de la distance et du temps. Le dégradé des couleurs chaudes aux couleurs froides reflète la baisse saisonnière des températures : les mesures ont commencé en août et se terminent en janvier.

A partir de cette image (Fig. 5.3.1a), les trois zones de fuites artificielles activées durant le programme d'essai (GEM, GEH et GWM) peuvent être repérées. A partir du mois de novembre, GWM est plus visible que les deux autres fuites. Ce n'est pas surprenant : le débit de GEM est coupé à partir du 4 novembre, celui de GEH est descendu à 1 l/min à cette même date et celui de GWM augmenté à 3 l/min au même moment.

Dans les zones de fuites, les capteurs sont plus sensibles aux variations journalières de température (Fig. 5.3.1b) que les capteurs hors zones de fuites. Pour le capteur dans la zone de fuite de GEH, la sensibilité aux variations journalières diminue avec le temps du fait de la diminution de débit injecté. Pour le capteur dans la zone de fuite de GWM dont le débit augmente au fil des paliers, l'effet inverse se produit : la sensibilité augmente. Toujours pour ce même capteur, on constate qu'après le dernier palier (le débit injecté est alors nul), les



(a) Image des températures de la fibre SI, placée sous le masque à hauteur intermédiaire, les trois zones de fuites sont légèrement visibles.



(b) Signaux de température de capteurs en zone de fuite et hors zone de fuite. Les traits verticaux hachurés indiquent les changements de paliers. Les valeurs des paliers de débit pour chaque fuite sont indiqués entre parenthèses en l/min.

FIGURE 5.3.1

fluctuations journalières du signal de température sont invisibles et progressivement, le signal de température rejoint celui enregistré pour un capteur hors zone de fuite.

L'analyse des données brutes de température permet de localiser la position des trois zones de fuites artificielles activées. Dans ces zones, les fluctuations journalières de température sont significativement plus importantes.

Dans la suite de cette étude, les modèles AJOUT et MORITO vont être appliqués. Nous verrons si l'emploi de ces modèles permet d'une part, d'améliorer la détection des fuites et d'autre part de quantifier les fuites détectées.

5.3.2 Analyse AJOUT

5.3.2.1 Détection des fuites artificielles

Le modèle journalier a été appliqué aux données des capteurs de SI (fibre sous le masque amont situé au « niveau intermédiaire » Fig. 5.1.3). Rappelons que les écarts journaliers entre la température estimée par AJOUT et celle mesurée constitue le paramètre de détection d_e de AJOUT. Les valeurs du paramètre de détection d_e , pour chaque capteur et chaque jour de mesure ont été représentées sur l'image Fig. 5.3.2. Elles révèlent clairement la présence de trois zones d'anomalies. En dehors de ces zones d'anomalies, d_e est globalement homogène et inférieur à $0,1^\circ\text{C}$. Du point de vue du modèle AJOUT, cela signifie que ces capteurs partagent rigoureusement les mêmes sources d'influence. En effet, la température reconstruite à partir de ces sources est très proche de la mesure. Ces capteurs ont un régime thermique similaire. Le régime n'est plus le même aux points d'anomalies. Des sources d'informations manquent pour reconstruire la température mesurée d'où les écarts constatés.

Ces zones d'anomalies correspondent spatialement aux trois fuites artificielles activées. La fuite GEM n'est visible que sur 95 jours environ. Alors que les deux autres, sont perceptibles jusque 120-125 jours. Ces durées sont conformes aux paliers de débits imposés. Le débit d'alimentation de GEM a été coupé environ un mois avant celui de GEH et GWM (Tab. 5.1). De 70 jours à 125 jours, la fuite GEH est moins visible que GWM. Cette différence de visibilité est à mettre en relation avec les débits d'entrée imposés sur l'une et l'autre fuite. Rappelons que les paliers de débit sur GEH sont décroissants et ceux sur GWM sont croissants. Sur la fin de la période d'essai, GEH est moins visible puisque le débit injecté et donc les vitesses d'écoulement sont moins importantes que sur GWM.

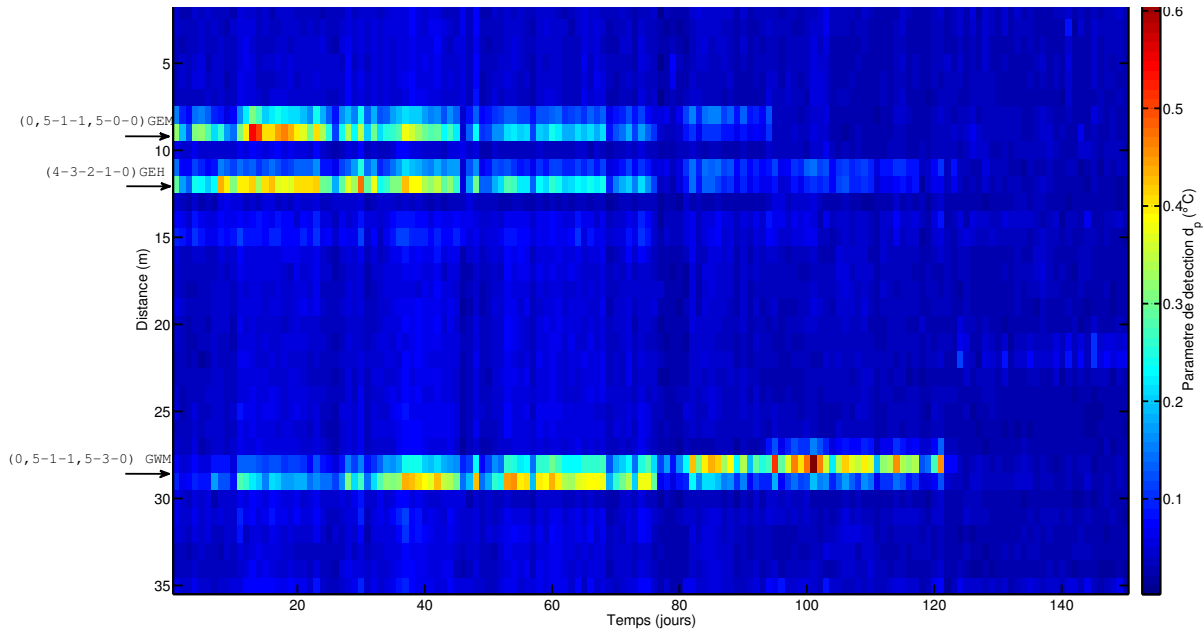


FIGURE 5.3.2: Image du paramètre de détection obtenu à partir des mesures de SI (fibre sous le masque amont situé au « niveau intermédiaire »)

5.3.2.2 Caractérisation des fuites détectées

Sensibilité de AJOUT aux variations de vitesse de fuite Les variations temporelles du paramètre de détection ont été tracées pour un capteur situé dans une zone de fuite et un autre situé immédiatement à côté de la zone de fuite (Fig. 5.3.3). Seules les résultats des zones de fuites de GEH et GWM2 sont présentés.

Pour le capteur situé dans la zone de fuite (représenté en bleu), la moyenne du paramètre de détection sur chaque palier de débit a été représenté en pointillés noirs. En première observation, on constate que les valeurs du paramètre de détection sont plus importantes pour le capteur dans la zone de fuite. La détection des zones de fuites par observation du paramètre de détection est effective.

Ensuite, pour les capteurs hors zone de fuite, l'évolution du paramètre de détection reste stable et comprise entre 0 et 0,05°C sur toute la période.

Pour le capteur dans la zone de fuite de GEH, il apparaît que la tendance d'évolution du paramètre de détection est décroissante. Elle est croissante pour celui dans la zone de fuite de GWM2. Ces tendances sont à mettre en relation avec l'évolution des paliers de débit : évolution décroissante pour GEH et croissante pour GWM2. La moyenne du paramètre de détection sur chaque palier (pointillés noirs) conforte la corrélation. L'évolution de la moyenne du paramètre de détection en zone de fuite pour GEH est quasi-linéaire avec la diminution du débit d'injection. Cette linéarité ne se retrouve pas pour GWM2. L'augmentation de la moyenne du paramètre de détection entre le palier à 1,5 l/min et 3 l/min est très faible : de l'ordre de 0,02°C.

Au bout de 125 jours, date à partir de laquelle les débits d'injection sont coupés, la valeur du paramètre de détection pour le capteur en zone de fuite et celui hors zone de fuite est comparable (autour de $0,05^{\circ}\text{C}$). Ce constat est d'autant plus marquant pour le capteur situé dans la zone de fuite de GWM2. La moyenne du paramètre de détection sur le palier à 3 l/min est de $0,3^{\circ}\text{C}$. Sur le palier suivant, à 0 l/min, cette moyenne chute à $0,05^{\circ}\text{C}$.

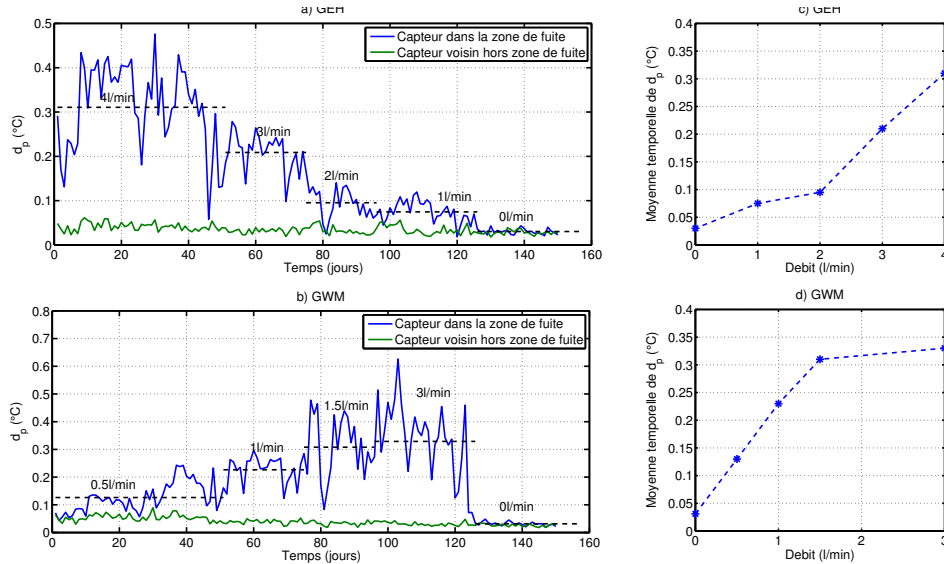


FIGURE 5.3.3: Évolution temporelle du paramètre de détection pour un capteur situé dans la zone de fuite et juste à côté. Étude des fuites GEH et GWM2 à partir des mesures de SI. En pointillés noirs, moyenne pour chaque palier de débit, du paramètre de détection du capteur situé en zone de fuite.

Variabilité temporelle du paramètre de détection Sur toute la durée du programme d'essais, le paramètre de détection présente pour les capteurs en zone de fuite, une forte variabilité temporelle. Pour le capteur dans la zone de fuite de GEH, le paramètre de détection passe brutalement de $0,3^{\circ}\text{C}$ à $0,05^{\circ}\text{C}$ en l'espace de deux ou trois jours. La variabilité est d'autant plus importante que le débit injecté est important. Ces variations du paramètre de détection sont liées aux variations des amplitudes journalières de température au capteur en zone de fuite (Fig. 5.3.4a). Plus les amplitudes de température sont importantes et plus le paramètre de détection est important. La corrélation entre ces deux variables est élevée tant qu'un débit est injecté. Lorsque le débit d'injection est nul, le coefficient de corrélation entre écarts et amplitudes journalières de température au capteur est quasi nul.

Les variations d'amplitudes journalières de température au capteur sont fortement liées à celle de la température de l'eau injectée (Fig. 5.3.4b). Le coefficient de corrélation entre ces deux variables a été calculé pour chaque palier de débit. Il apparaît que le lien entre l'amplitude au capteur et celle de l'eau est d'autant plus fort que le débit est important. Physiquement, ce résultat exprime que, plus la vitesse de fuite est importante, plus la tem-

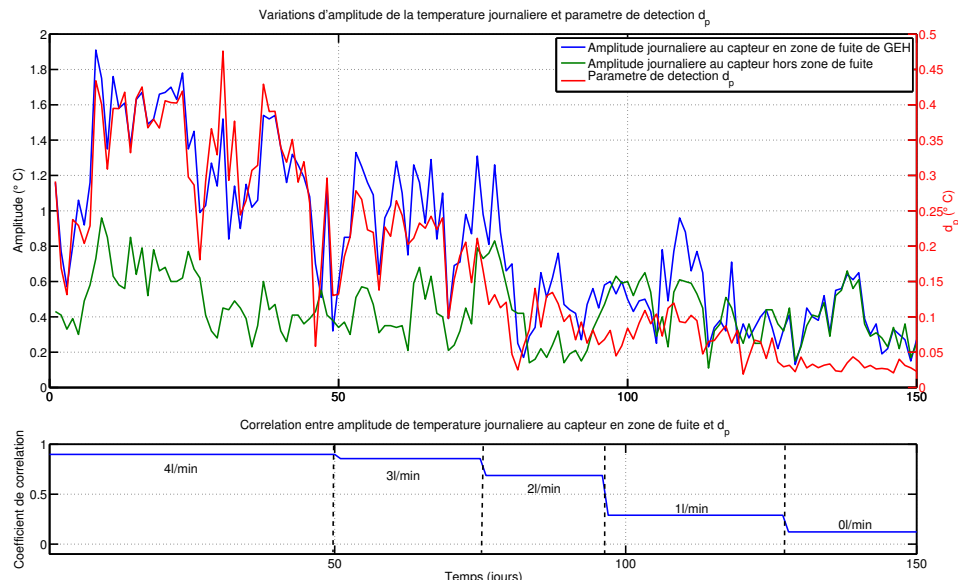
pérature dans la zone de fuite est liée à celle du réservoir (ici la température de l'eau injectée).

Finalement, l'explication suivante peut être avancée concernant la forte variabilité du paramètre de détection. Lorsque la vitesse de fuite est importante, comme c'est le cas pour le palier de débit à 4 l/min, la température d'un capteur en zone de fuite dépend fortement de la température injectée. Cette température diffère de celle relevée aux capteurs situés hors zone de fuite. Les différences seront potentiellement d'autant plus grandes que la sensibilité à la température de l'eau injectée est importante. L'importance de ces différences est ensuite liée à l'intensité des amplitudes journalières. Lorsque celle-ci est faible, la différence entre la température d'un capteur en zone de fuite et celle d'un capteur hors zone de fuite sera moins importante que lorsque l'amplitude journalière de l'eau injectée est grande. Rappelons que la température reconstruite par AJOUT correspond à celle d'un capteur hors zone de fuite. D'après le raisonnement précédent, les écarts journaliers relevés (qui constituent le paramètre de détection) vont donc suivre les tendances suivantes :

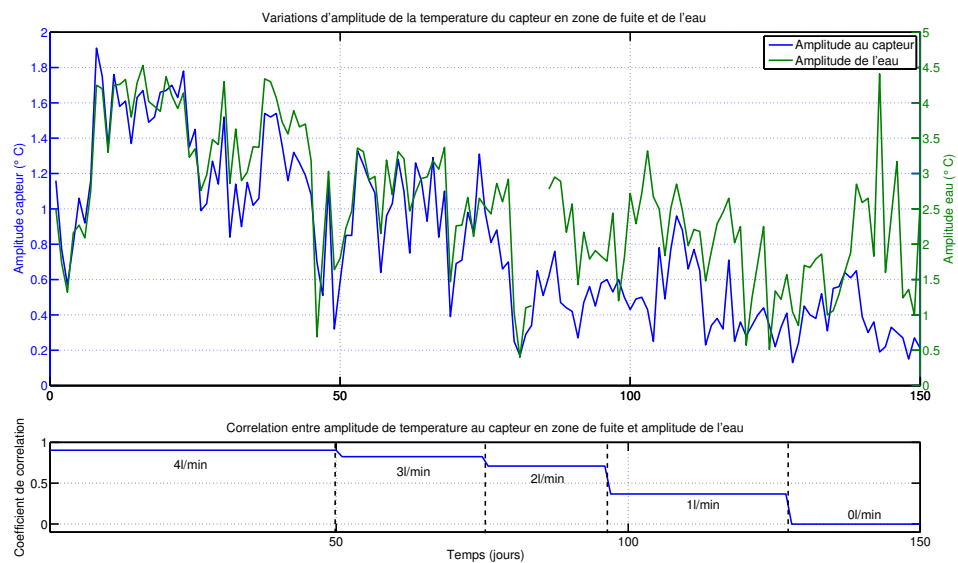
- hors zone de fuite, les écarts seront faibles, par construction du modèle AJOUT.
- en zone de fuite :
 - les écarts vont dépendre de l'amplitude journalière de la température injectée : le lien sera d'autant plus fort que la vitesse sera importante.
 - l'amplitude de ces écarts dépendra d'une part de l'intensité du lien « écart /amplitude eau injectée » réglé par la vitesse de fuite et d'autre part de la valeur de l'amplitude journalière de l'eau injectée

Les variations du paramètre de détection sont liées aux variations d'amplitudes journalières de température du capteur en zone de fuite tant que le débit injecté n'est pas nul. Nous avons ensuite montré que ces variations d'amplitude au capteur sont liées aux variations d'amplitudes de la température de l'eau injectée. Ce lien est d'autant plus fort que le débit injecté est élevé. On en conclut que lorsque le débit injecté n'est pas nul, les variations du paramètre de détection sont liées aux variations d'amplitudes journalières de la température de l'eau injectée.

5. TEST DES MODÈLES DE CARACTÉRISATION DE FUITES SUR DES DONNÉES SEMI-CONTRÔLÉES ISSUES DE LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE PEERINE



(a) Mise en évidence d'une corrélation entre les variations d'amplitudes journalières et variations du paramètre de détection. (En haut) Variation des amplitudes journalières de température d'un capteur situé dans et hors de la zone de fuite de GEH et variations du paramètre de détection pour ce même point. (En bas) Coefficient de corrélation entre variations d'amplitudes et variations du paramètre de détection calculé pour chaque palier de débit.



(b) Mise en évidence du lien entre les variations d'amplitude journalière de la température d'un capteur situé en zone de fuite et celles de la température de l'eau. (En haut) Variation des amplitudes journalières de température d'un capteur situé dans la zone de fuite de GEH et variations des amplitudes journalières de la température de l'eau. (En bas) Coefficient de corrélation entre les variations d'amplitudes journalières d'un capteur en zone de fuite et celles de l'eau calculé pour chaque palier de débit.

FIGURE 5.3.4

5.3.3 Analyse MORITO

5.3.3.1 Détection des fuites artificielles

Les fuites GEH et GWM ont été activées de début août à mi-décembre 2009 (Tab. 5.1). Le modèle MORITO a été appliqué aux données de SI (fibre sous le masque amont situé au « niveau intermédiaire ». Fig. 5.1.3). Pour la détection, la source d'influence thermique majoritaire doit être utilisée comme variable d'entrée. Les zones d'anomalies sont les zones où une source d'influence majoritaire ne permet pas de décrire la température mesurée. Dans ces zones, le paramètre écart d_e , représentant l'écart entre la température modélisée et mesurée (Eq. 5.3.5), est plus important. Rappelons que d_e est le paramètre utile pour la détection. Dans notre cas, les capteurs thermiques, que sont les fibres optiques, sont situés immédiatement derrière le masque amont i.e. proche de l'eau du bassin. La source thermique d'influence principale est donc la température de l'eau du bassin. Elle a donc été utilisée comme variable d'entrée de MORITO1-eau. Le tracé du paramètre écart d_e des capteurs de SI met en évidence trois zones singulières (Fig. 5.3.5). Dans ces zones, d'environ trois mètres de large, d_e augmente soudainement. Ces zones correspondent spatialement aux trois fuites artificielles activées : GEM, GEH et GWM. En dehors de ces zones, d_e est stable et compris entre 0,27°C et 0,30°C.

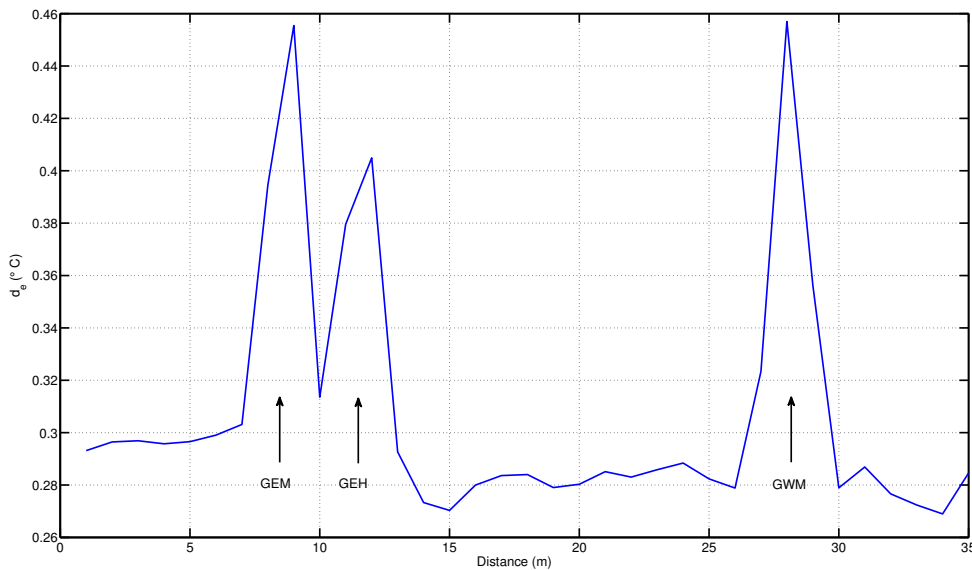


FIGURE 5.3.5: Paramètre écart d_e de MORITO1-eau appliqué sur des données de SI (capteurs sous le masque amont situé au « niveau intermédiaire ») pour l'ensemble de la période d'essai, détection des trois zones de fuite.

Lorsque MORITO1-eau est appliqué aux données de l'ensemble de la période d'essais, une fonction impulsionnelle est identifiée pour l'ensemble de la période pour chaque capteur. Pour les capteurs situés hors zone de fuite, aucune perturbation n'est apportée durant toute la

période d'essai. La fonction impulsionnelle, qui joue le rôle de fonction de transfert, convient pour modéliser cette situation stable. Le paramètre écart d_e , mesurant les écarts entre la modélisation et la mesure, est donc faible. Pour les capteurs en zone de fuite, des perturbations sont apportées : elles correspondent aux différents paliers de débit. Une fonction de transfert ne peut convenir pour l'ensemble de la période d'essai. A chaque palier de fuite le système change. La fonction de transfert doit également changer. La fonction de transfert identifiée pour l'ensemble de la période dans les zones de fuite ne peut reproduire la température mesurée : le paramètre écart d_e est important.

5.3.3.2 Caractérisation des fuites détectées

Écarts entre température modélisée et température mesurée La quantification à partir de MORITO est basée sur l'analyse de la fonction impulsionnelle identifiée (Par. 4.1.3.3). Avant d'analyser les fonctions impulsionnelles identifiées, il est important de s'interroger sur la performance de la modélisation effectuée. Cette performance est renseignée par le paramètre écart d_e qui mesure les écarts entre la température modélisée et la température estimée. Nous allons donc analyser les valeurs de d_e obtenues pour chaque capteur à chaque palier de débit (Fig. 5.3.6).

Suivant les paliers de débit, les valeurs du paramètre écarts d_e obtenues pour les capteurs de SI présentent une plus ou moins forte dispersion. Pour les paliers 1 et 2, la dispersion est globalement faible. Seuls quelques capteurs présentent un d_e éloigné de la moyenne. Ces capteurs sont situés dans les zones de fuites. Au palier 2, un point situé en périphérie de la zone de fuite de GWM présente une d_e important.

Pour les paliers 3 et 4, les valeurs de d_e sont globalement plus élevées. Au palier 3, la zone de fuite de GEH se distingue moins facilement. Au palier 4, la baisse soudaine de d_e dans la zone de fuite de GWM est à noter. Pour ce palier, GEM n'est plus mise en évidence, ce qui est normal puisqu'à ce palier, le débit injecté est nul.

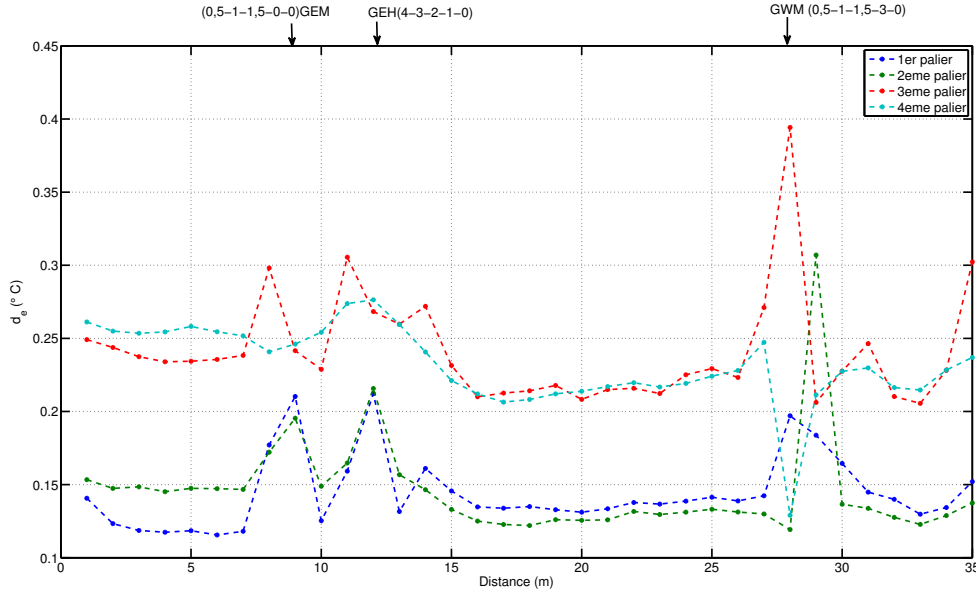


FIGURE 5.3.6: Paramètre écart d_e de MORITO1-eau pour chaque capteur aux différents paliers de débit. Les valeurs des paliers de débit pour chaque fuite sont indiquées entre parenthèses en l/min.

Corrélation entre données d'entrée et données de sortie Une valeur élevée du paramètre écart d_e peut avoir plusieurs significations :

- Le modèle peut être remis en cause ; la modélisation proposée peut être inadaptée pour expliquer le lien entre les données d'entrée, i.e. les températures de l'eau injectée et les données de sortie, i.e. les températures mesurées au niveau de la fibre optique.
- Les données que l'on cherche à mettre en relation à travers un modèle ne partagent pas assez d'informations, elles sont trop peu corrélées.

Le coefficient de corrélation entre les données de température de l'eau injectée et celles fournies par la fibre optique donne une mesure de la similarité des données. Notons qu'en raison des phénomènes de transport par advection et de diffusion thermique, le signal d'entrée et le signal de sortie sont déphasés d'un certain temps que nous nommerons temps retard et noterons t_{rc} . Pour obtenir une mesure de corrélation satisfaisante, le temps retard doit être pris en compte.

Pour estimer t_{rc} , le coefficient de corrélation a été calculé sur différentes fenêtres d'observation. Chaque fenêtre est décalée d'un certain temps par rapport à l'autre. Le décalage offrant la meilleure corrélation a été retenu comme temps retard. Cette méthode, détaillée dans l'annexe A revient à chercher le retard offrant le maximum d'intercorrélation entre les deux signaux. La recherche du t_{rc} optimal a été contrainte à un intervalle limité entre 0h et 7h. Cette contrainte a été imposée en rapport avec les déphasages observés graphiquement entre le signal d'entrée et le signal de sortie (Fig. 5.3.7).

Par la suite, nous appellerons analyse de corrélation la méthode consistant dans un premier temps à rechercher le temps retard optimal t_{rc} et, dans un second temps, à calculer le coefficient de corrélation entre les signaux sur la nouvelle fenêtre d'observation (cf A).

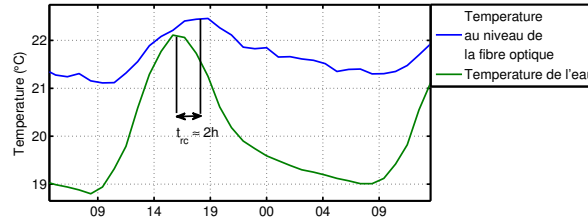


FIGURE 5.3.7: Estimation graphique du temps retard t_{rc}

Concernant les coefficients de corrélation, les valeurs obtenues pour les paliers 1 et 2 sont globalement plus élevées (comprises entre 0,65 et 0,9) que celles obtenues pour les paliers 3 et 4 (Fig. 5.3.8 (Haut)). Pour les paliers 1 et 2, la corrélation augmente au niveau des zones de fuites. Pour GWM, la corrélation est plus forte au palier 2 qu'au palier 1 : entre ces deux paliers, le débit a été doublé. Pour GEH et GEM, les variations de débit injecté n'ont pas d'effet sur la corrélation. Pour les paliers 3 et 4, le coefficient de corrélation, pour certains capteurs, devient inférieur à 0,5, exprimant un lien très faible entre le signal d'entrée et le signal de sortie. Au palier 3, l'ensemble des capteurs hors zone de fuite est concerné. Une corrélation satisfaisante est observée dans la zone de fuite de GWM (supérieure à 0,7). Pour le palier 4, la corrélation dépasse 0,65 pour les capteurs situés dans la zone de fuite de GEH et dans celle de GWM.

Les temps retards t_{rc} estimés pour les paliers 1 et 2 sont comparables (Fig. 5.3.8 (Bas)). Ils se situent entre une heure et six heures. Ces valeurs correspondent à celles observées graphiquement. Pour le palier 1, les retards les plus faibles (1h) sont atteints dans les zones de fuite de GEM et GEH. Au palier 2, t_{rc} diminue également dans la zone de fuite de GWM. Pour les paliers 3 et 4, les retards estimés doivent être analysés avec prudence. En effet pour ces paliers, les valeurs de corrélation sont globalement faibles, ce qui réduit la confiance des estimations faites. Nous ne nous intéresserons qu'aux estimations faites pour les capteurs présentant un coefficient de corrélation supérieur à 0,65. Cela nous limite pour le palier 3 aux capteurs situés dans la zone de fuite de GWM et pour le palier 4 aux capteurs dans celle de GEH et GWM. Pour ces capteurs, situés à une distance de 26 m, les valeurs de t_r estimées sont de 1h.

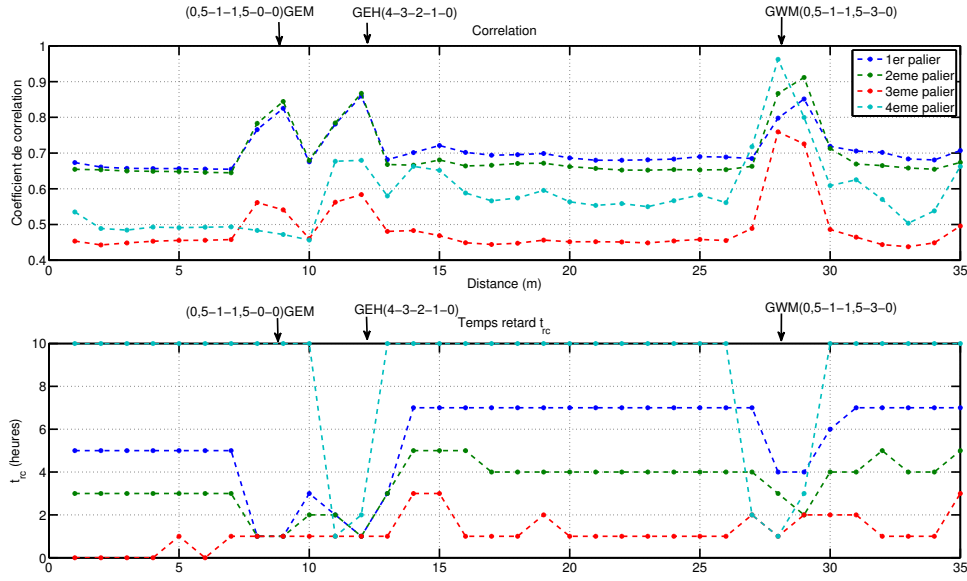


FIGURE 5.3.8: Haut : Corrélation entre les données de température de SI et celles de température de l'eau injectée pour chaque palier de fuite.

Bas : Temps retard estimé t_{rc} entre la température de SI et celle de l'eau injectée

Les valeurs des paliers de débit pour chaque fuite sont indiquées entre parenthèses en l/min.

Finalement, l'étude de la corrélation entre les données d'entrée du modèle, i.e. les données de température d'eau injectée, et les données de sortie, la température au niveau des capteurs de SI, nous a montré que :

- la corrélation est bonne pour le palier 1 et le palier 2 sur l'ensemble des capteurs
- la corrélation est variable pour les paliers 3 et 4 :
 - elle est faible pour l'ensemble des capteurs situés hors fuite,
 - elles est bonne pour les capteurs dans la zone de fuite de GWM (palier 3 et 4) et dans celle de GEH (palier 4 uniquement).

Ces informations permettent de mieux comprendre les valeurs obtenues avec MORITO1-eau du paramètre écart d_e (Fig. 5.3.6). Pour les paliers 3 et 4, les valeurs obtenues du paramètre écart sont globalement plus importantes du fait du manque de corrélation entre données d'entrées et données de sortie. Lorsque la corrélation est meilleure, le paramètre écart est dans l'ensemble plus faible. Ce constat est valable pour les points situés dans la zone de fuite de GWM2. Pour les paliers 1 et 2 où la corrélation est bonne, les valeurs du paramètre écart sont également plus faibles dans l'ensemble. Notons qu'au palier 2, le point situé à 29 m échappe à cette conclusion : la corrélation est bonne et le paramètre écart est deux fois plus important que sur les autres capteurs. Nous tenterons par la suite d'expliquer cette observation.

La poursuite de l'analyse des résultats de MORITO devra ainsi prendre en compte les conclusions de l'étude faite sur les corrélations des données d'entrée et de sortie du modèle.

D'après ces conclusions, la confiance dans les résultats du modèle est bonne pour les paliers 1 et 2. Contrairement aux paliers 3 et 4 où la confiance est médiocre, sauf pour les capteurs situés dans la zone de fuite de GWM2.

Estimation de vitesses de fuites à partir du temps retard t_{rc} Dans les zones de fuites de GEM, GEH et GWM, les temps retard t_{rc} obtenus par intercorrélations correspondent aux temps de parcours de l'information thermique pour aller du réservoir au capteur situé sous le masque amont. Cette distance est d'environ 1,50 m. La vitesse de déplacement de l'information thermique, que nous noterons v_t est peut donc être calculée (Tab. 5.3). Dans le chapitre 3 (Eq. 2.2.2), nous avons vu que cette vitesse peut être reliée à la vitesse d'écoulement notée v_f :

$$v_t = \frac{(\rho c_p)_w}{(\rho c_p)_{sol}} \cdot v_f \quad (5.3.1)$$

$(\rho c_p)_w$ et $(\rho c_p)_{sol}$ sont respectivement la capacité calorifique volumique de l'eau et du sol [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$]. Dans la littérature, la valeur usuelle de la capacité calorifique volumique de l'eau est : $4,18 \cdot 10^{-6} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$. Une valeur standard issue de la littérature a été utilisée pour la capacité calorifique volumique du sol : $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$. Les vitesses d'écoulement v_f ont donc pu être estimées (Tab. 5.3).

Pour les capteurs dans les zones de fuite de GEM ou GEH, les vitesses estimées ne varient pas ou très peu en fonction du débit injecté. En revanche, pour GWM, la vitesse estimée augmente avec le débit injecté. Cette différence de comportement est liée à la conception du dispositif de drainage :

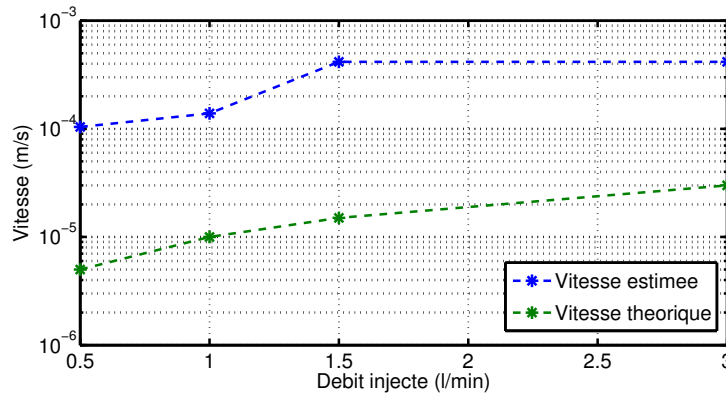
- en face Est (où se trouvent GEM et GEH), un géo-espaceur (filet maillé en plastique) de quelques centimètres d'épaisseur assure le drainage; il semblerait que l'écoulement se face rapidement si bien que les variations de vitesse apportées ne provoquent aucun changement de température.
- en face Ouest (où se trouve GWM), un tapis granulaire en sable permet le drainage; l'écoulement se fait plus lentement et pour les vitesses testées une influence sur le temps retard t_{rc} est visible.

	Capteur dans la zone de fuite de GEM			Capteur dans la zone de fuite de GEH				Capteur dans la zone de fuite de GWM			
Débit injecté (l/min)	0,5	1	1,5	4	3	2	1	0,5	1	1,5	3
Temps retard t_{rc} (h)	1	1	1	1	1	1	2	4	3	1	1
Vitesse thermique v_t (m/s)	4.10^{-4}	4.10^{-4}	4.10^{-4}	4.10^{-4}	4.10^{-4}	4.10^{-4}	2.10^{-4}	$1,0.10^{-4}$	$1,5.10^{-4}$	4.10^{-4}	4.10^{-4}
Vitesse théorique de l'écoulement $v_{f,th}$ (m/s)	X	X	X	X	X	X	X	5.10^{-6}	1.10^{-5}	$1,5.10^{-5}$	3.10^{-5}
Vitesse estimée de l'écoulement v_f (m/s)	2.10^{-4}	2.10^{-4}	2.10^{-4}	2.10^{-4}	2.10^{-4}	2.10^{-4}	1.10^{-4}	5.10^{-5}	7.10^{-5}	2.10^{-4}	2.10^{-4}

TABLE 5.3: Estimation de vitesses d'écoulement dans les zones de fuites

Concernant la zone de fuite de GWM, une estimation théorique de la vitesse d'écoulement peut être obtenue. Pour cela, il faut estimer la section S de la zone de l'écoulement dans le tapis granulaire de 30 cm d'épaisseur. Nous allons supposer que la section d'écoulement est de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$. Connaissant le débit Q d'injection, on en déduit une estimation de la vitesse théorique d'écoulement noté $v_{f,th} = \frac{Q}{S}$ (Tab. 5.3).

$v_{f,th}$ est environ 10 fois inférieure à v_f , la vitesse estimée à partir du temps retard t_{rc} (Fig. 5.3.9). La section S d'écoulement choisie surestime certainement la section réelle d'écoulement.

FIGURE 5.3.9: Vitesse estimée à partir de t_{rc} et vitesse théorique dans la zone de fuite de GWM

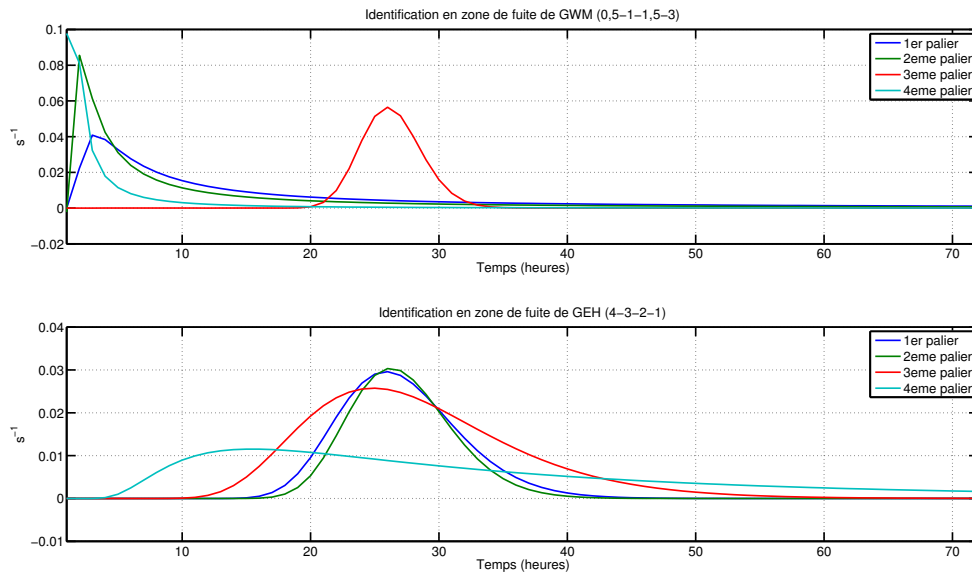


FIGURE 5.3.10: Fonctions impulsionnelles identifiées dans les zones de fuite de GWM et GEH. Les valeurs des paliers de débit pour chaque fuite sont indiquées entre parenthèses en l/min.

Fonction impulsionnelle identifiée dans les zones de fuites Dans MORITO, la fonction impulsionnelle définit en quelque sorte la fonction de transfert du système étudié. Rappelons que deux fonctions impulsionnelles ont été proposées : l'approximation irfa2 et l'approximation exponentielle. L'approximation irfa2 est la fonction impulsionnelle utilisée par défaut dans les analyses avec MORITO. La méthode de quantification proposée avec MORITO nécessite l'utilisation de l'approximation irfa2 (§4.1.3.3). L'abscisse correspondant au maximum de la fonction impulsionnelle irfa2 renseigne sur le déphasage entre les données d'entrées (température de l'eau injectée) et les données de sortie (température au niveau des capteurs thermiques).

La fonction impulsionnelle identifiée pour chaque palier de débit dans les zones de fuites de GWM et GEH a été tracée (5.3.10). Les fonctions identifiées dans la zone de fuite de GWM présentent un maximum avant 5 heures pour les paliers 1, 2 et 4. Pour le palier 3, le maximum est atteint au bout de 25 heures environ. Le modèle estime donc un déphasage entre données d'entrée et données de sortie variable : inférieur à 5 heures pour les paliers 1, 2, 4 et approximativement 1 jour pour le palier 3. L'estimation est plausible pour les paliers 1, 2 et 4. D'ailleurs les retards estimés par l'analyse de corrélation (Fig. 5.3.8) sont compris entre 1 heure et 5 heures dans la zone de fuite de GWM. L'estimation est incorrecte pour le palier 3. Elle surestime de 1 jour le retard. En conséquence, le signal de température estimé est déphasé d'un jour par rapport au signal mesuré. Ce décalage est visible graphiquement, notamment aux endroits mis en évidence par les rectangles (Fig. 5.3.11). Une analyse de corrélation met clairement en évidence ce déphasage : le coefficient de corrélation entre la température estimée et celle mesurée est de 0,88. Maintenant, si l'on décale d'un jour le

signal modélisé, le coefficient de corrélation obtenu est alors de 0,94.

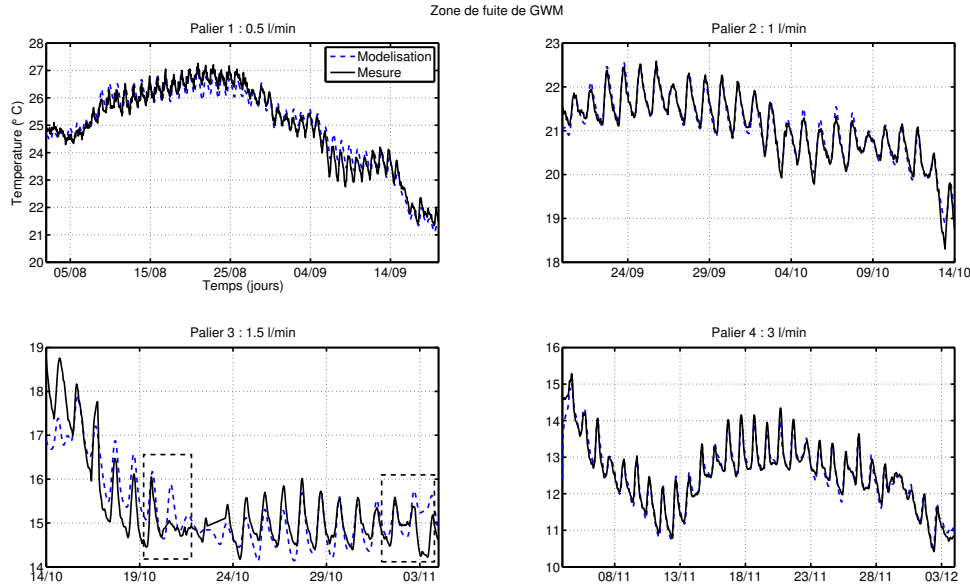


FIGURE 5.3.11: Températures estimées par Morito et mesurées pour un point situé dans la zone de fuite de GWM. Chaque graphique représente les données relatives à un palier de débit. Plus la vitesse est importante, plus les estimations sont bonnes.

Concernant les fonctions impulsionnelles identifiées dans la zone de fuite de GEH (Fig. 5.3.10(Bas)), le retard estimé est également incorrect. Cependant pour GEH, ce problème est commun aux quatre paliers de fuite. Pour les deux premiers paliers, le retard estimé est d'environ un jour et pour les deux derniers il approche un jour et demi.

Ces problèmes d'identification de fonction impulsionnelle expliquent la valeur élevée du paramètre écart relevé au palier 2 pour le point situé à 29 m et dans la zone de fuite de GWM.

Résultats de MORITO avec approximation exponentielle : MORITO1-exp Compte tenu des problèmes d'identification constatés lorsque l'approximation irfa2 est utilisée comme fonction impulsionnelle, l'approximation exponentielle a été testée. Rappelons que MORITO1-exp est le modèle utilisant l'approximation exponentielle comme fonction impulsionnelle (Tab. 4.3).

Les valeurs du paramètre écart obtenues à partir de MORITO1-exp (Fig. 5.3.12), présentent des similarités avec celles de MORITO1-eau (Fig. 5.3.6) :

- le paramètre écart d_e est globalement plus faible aux paliers 1 et 2. Pour ces deux paliers, le paramètre écart augmente dans les zones de fuites.
- au palier 3, le paramètre écart est élevé (en rapport aux deux paliers précédents) pour l'ensemble des capteurs
- au palier 4, le paramètre écart baisse dans la zone de fuite de GWM

Les mêmes explications que celles fournies précédemment justifient ces observations. La baisse de corrélation entre la température au niveau des capteurs et celle de l'eau injectée explique la hausse globale du paramètre écart d_e pour les paliers 3 et 4. Seul un capteur conserve une bonne corrélation au palier 4, celui dans la zone de fuite de GWM avec un débit injecté de 3 l/min.

En revanche, pour les paliers 1 et 2, les valeurs de d_e obtenues à partir de MORITO-exp sont légèrement plus faibles que celles de MORITO-irfa2.

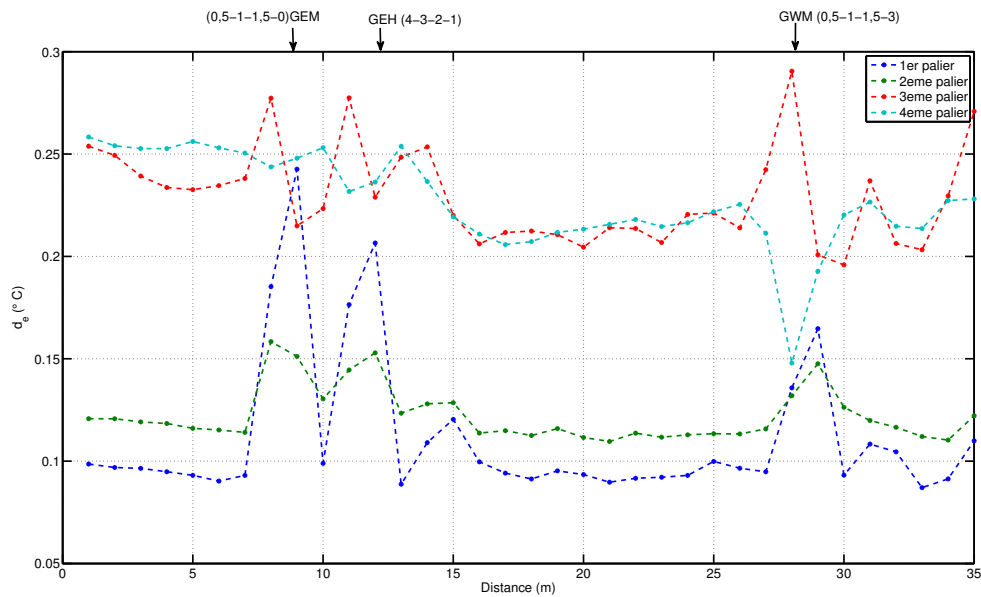


FIGURE 5.3.12: Paramètre écart d_e obtenu à partir de MORITO1-exp pour chaque capteur aux différents paliers de débit. Les valeurs des paliers de débit pour chaque fuite sont indiquées entre parenthèses en l/min.

Dans MORITO1-exp, la fonction impulsionnelle identifiée est une exponentielle décroissante dépendant de deux paramètres, notés K et τ (Eq. 4.1.9). La pente à l'origine de la fonction impulsionnelle renseigne sur le déphasage entre les données d'entrée (température de l'eau injectée) et les données de sortie (température au niveau de la fibre optique) que nous avons nommé précédemment temps retard. Plus la valeur absolue de cette dérivée est grande, plus le temps retard est faible. La valeur absolue de cette dérivée est donnée par le rapport $\frac{K}{\tau}$. Ce rapport, qui a la dimension de l'inverse d'un temps au carré, a été étudié pour l'ensemble des capteurs de SI et pour les différents paliers de débit. Par la suite, nous appellerons pente à l'origine ce rapport.

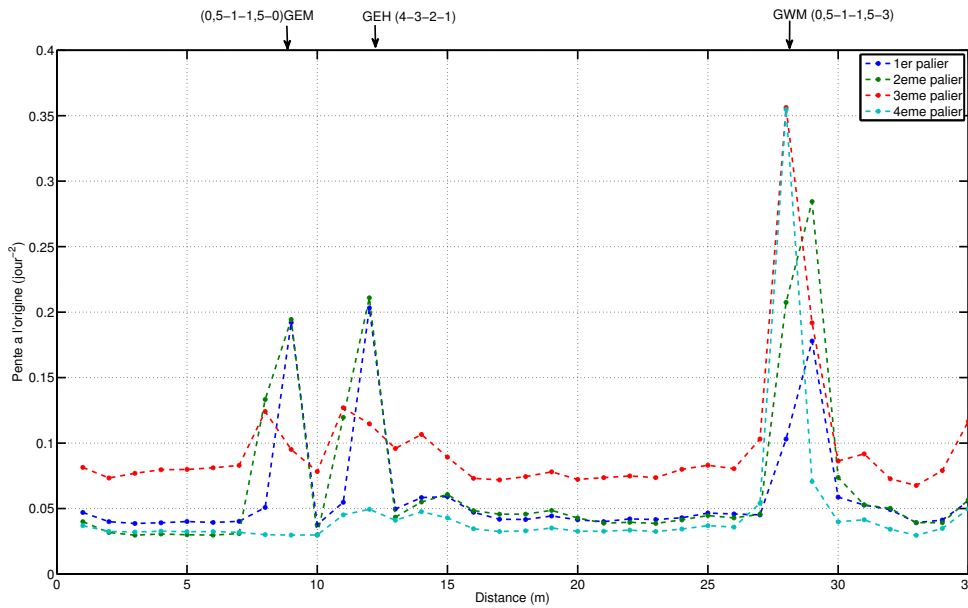


FIGURE 5.3.13: Pente à l'origine pour chaque palier de débit (rapport des paramètres K et T_0 de la fonction impulsionnelle exponentielle), sensibilité au temps retard entre données d'entrées et données de sortie

Pour les paliers 1, 2 et 4, la dérivée initiale augmente significativement dans l'ensemble des zones de fuites. Pour le palier 3, seule la zone de fuite de GWM est marquée par une forte augmentation de la dérivée initiale. A ce palier, les valeurs de dérivée initiale obtenues pour les autres capteurs sont globalement supérieures à celles des paliers 1, 2 et 4. Les résultats de ce palier sont exclues des analyses suivantes. En zone de fuite de GWM, l'augmentation de la dérivée initiale suit l'augmentation de débit (Fig. 5.3.14). Pour les zones de fuites de GEM et GEH, le lien entre changement de débit et dérivée initiale estimée est moins évident. Au palier 1 et 2, la vitesse reste stable malgré le changement de débit. Au palier 4, la dérivée initiale, calculée dans la zone de fuite de GEM, est similaire à celle obtenue dans les zones hors fuite. Ce résultat est cohérent car pour ce palier, le débit injecté dans GEM est nul. Pour GEH, seule une très faible augmentation de la dérivée initiale est perceptible au palier 4. La moins bonne sensibilité aux variations de débit constatées dans les zones de fuites de GEM et GEH est à mettre en relation avec l'analyse de corrélation entre la température au capteur et celle de l'eau injectée (Fig. 5.3.8). Dans ces zones, le coefficient de corrélation restait stable aux paliers 1 et 2. Au palier 4, le coefficient de corrélation ne montrait qu'une très légère augmentation dans la zone de fuite de GEH. Pour la zone de fuite de GWM, le coefficient de corrélation suivait l'augmentation de débit. Ces différences de corrélation entre les zones de fuites sont probablement liées à la conception du système d'étanchéité côté Est et Ouest. Côté Est, la fibre optique est placée derrière un géo-espaceur : une sorte de grillage en plastique de quelques centimètres d'épaisseur. Côté Ouest, la fibre optique est placée derrière un tapis granulaire de 30 cm d'épaisseur.

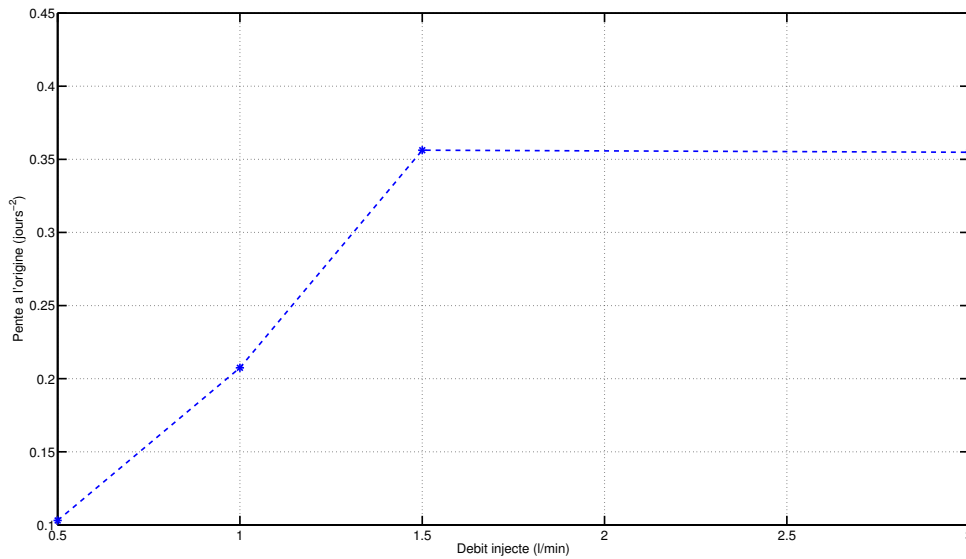


FIGURE 5.3.14: Pente à l'origine dans la zone de fuite de GWM, évolution corrélée avec celle du débit de fuite

Conclusion Dans un premier temps, le modèle MORITO a été appliqué dans un but de détection aux données de SI (fibre sous le masque amont situé au « niveau intermédiaire ») sur l'ensemble de la période d'essais. L'analyse du paramètre écart d_e a permis de mettre clairement en évidence les trois fuites artificielles activées, caractérisées par un d_e plus grand.

Dans un second temps, MORITO a été appliqué à chacune des périodes correspondant aux différents débits de fuite. Le paramètre écart obtenu pour chaque capteur a été comparé au coefficient de corrélation entre les mesures capteurs et les données de température de l'eau injectée. Ces analyses de corrélation ont été utilisées pour déterminer les capteurs pour lesquels MORITO était applicable. Pour certains capteurs, la corrélation avec la température de l'eau injectée est trop faible. Ils ne partagent pas assez d'informations. Dans les zones de fuite, la corrélation s'est avérée suffisante pour appliquer MORITO. Outre l'utilité de définir l'applicabilité de MORITO, il s'avère que les analyses de corrélation permettent, non seulement de localiser les zones de fuite, mais également d'estimer un déphasage, appelé temps retard, entre données d'entrée et données de sortie. Ces estimations de temps retard nous ont permis de quantifier les écoulements dans les zones de fuites. La quantification est possible derrière le drain en sable (face Ouest) mais plus compliquée derrière le géo-espaceur (face Est) où les vitesses d'écoulements sont certainement trop rapides.

Les fonctions impulsionnelles identifiées aux zones de fuites ont ensuite été étudiées. Ces fonctions permettent d'estimer le temps retard entre la température mesurée au capteur et celle de l'eau injectée. Dans certains cas, le temps retard estimé correspond à celui identifié graphiquement ou à partir des analyses de corrélation. Dans d'autres, le temps retard estimé est incorrect, souvent décalé d'une journée entière. Le décalage d'une journée est probable-

ment lié à la forte périodicité des mesures de température sur le site d'Aix en Provence : sur une journée, l'évolution des températures suit bien souvent une tendance sinusoïdale. Ces problèmes d'identification compliquent les analyses faites à partir de MORITO.

Du fait de ces problèmes d'identification, le modèle MORITO1-exp a ensuite été testé. Les estimations de MORITO1-exp présentent un paramètre écart plus faible. Le rapport des deux paramètres, K et τ , de la fonction impulsienne de MORITO1-exp, que nous avons appelé pente à l'origine, permet de localiser les différentes zones de fuites. Pour la zone de fuite de GWM où les capteurs reposent sous un drain en sable, l'évolution de la pente à l'origine suit celle du débit. Cette sensibilité au débit injecté et donc à la vitesse de fuite n'a pas été aussi nettement retrouvée pour les deux autres zones de fuites où la fibre repose derrière un géo-espacement : les vitesses d'écoulements sont certainement trop rapides.

Pour l'analyse des données d'une fibre placée sous un masque amont, le modèle MORITO1-exp s'est avéré fournir des informations plus riches concernant la quantification que celles de MORITO1-eau. A partir de MORITO1-exp une sensibilité aux variations de débit et donc de vitesses de fuites a été démontrée pour certains capteurs.

5.4 Analyse des données aval

5.4.1 Rappel du programme aval

Trois fuites à travers le remblai ont été testées : une fuite en face Est, REH, en position haute, et deux fuites en face ouest, RWB, en position basse et RWH en position haute.

REH		RWB		RWH	
Dates	Débit (l/min)	Dates	Débit (l/min)	Dates	Débit (l/min)
05/12/09 au 07/01/10	0,5	05/11/09 au 14/12/09	0,5	05/12/09 au 07/01/10	7
07/01/10 au 08/02/10	1	14/12/09 au 23/01/10	1	07/01/10 au 08/02/10	4
08/02/10 au 12/03/10	2	23/01/10 au 04/03/10	4	08/02/10 au 12/03/10	1
12/03/10 au 13/04/10	4	04/03/10 au 13/04/10	7	12/03/10 au 13/04/10	0,5

TABLE 5.4: Paliers de débit imposés sur les fuites à travers le remblai : REH, RWB et RWH

5.4.2 Aperçu des données brutes

Comme pour l'analyse des données brutes amont, les mesures des capteurs en face Est (BE, ME) et en face Ouest (BW, MW) sur toute la période de la campagne d'essais ont été représentées sous forme d'images (Fig. 5.4.1). Les positions des trois zones de fuites artificielles activées sont indiquées par des flèches. Sur ces images, les zones de fuite ne se distinguent pas ou très peu : sur l'image de BW, la zone de fuite RWB est légèrement visible. D'ailleurs, en comparant les données de température d'un capteur dans la zone de fuite de RWB et hors de cette zone de fuite, on constate que les fluctuations journalières de température sont de plus en plus grandes pour le capteur dans la zone de fuite, du fait de l'augmentation du débit injecté (Fig. 5.4.2).

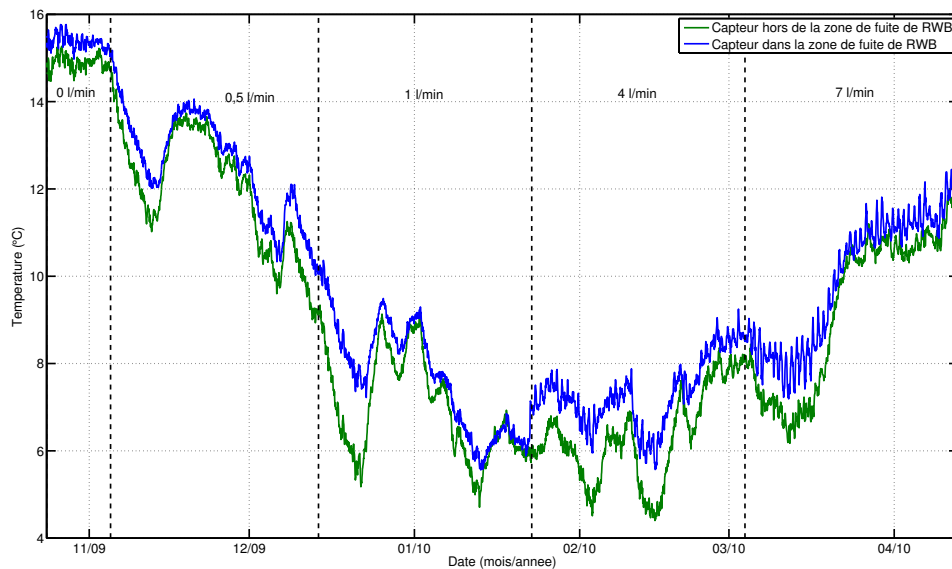
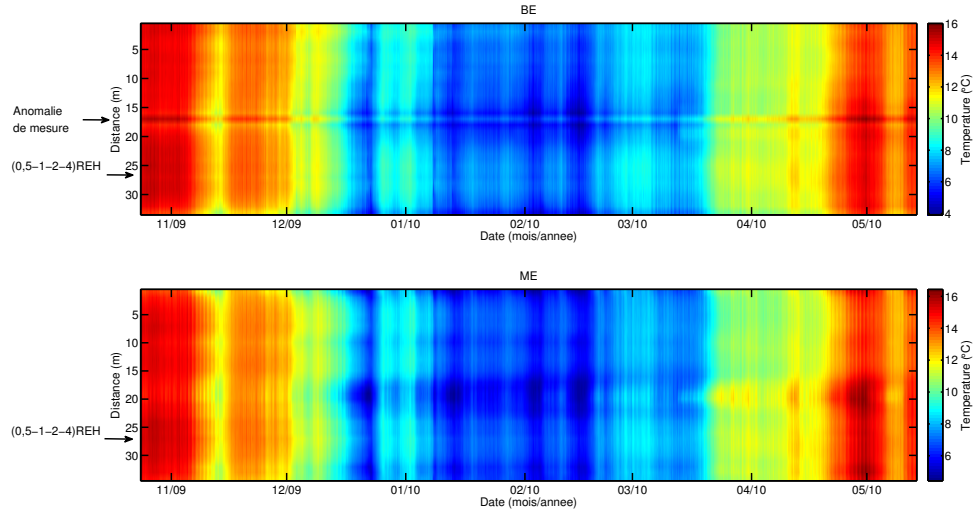


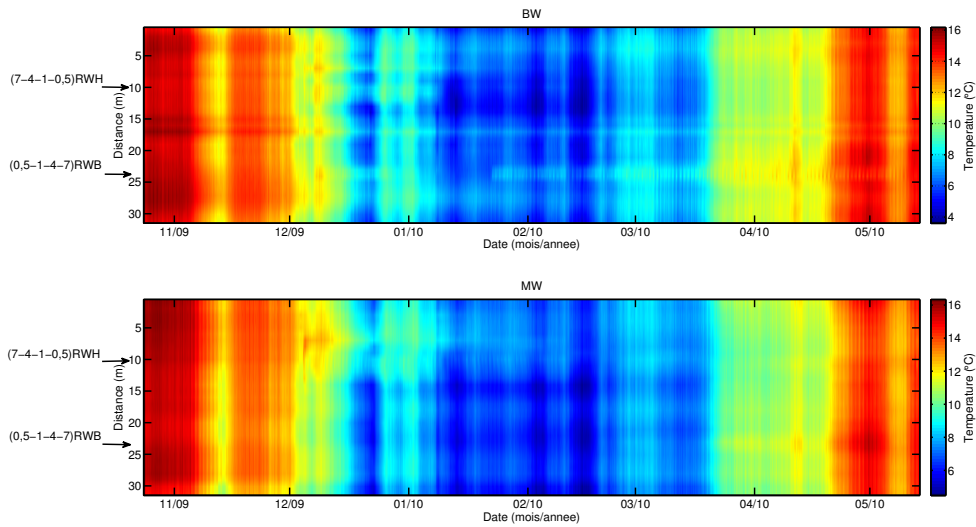
FIGURE 5.4.2: Signaux de température de capteurs dans la zone de fuite de RWB et hors de cette zone de fuite. Les traits verticaux hachurés indiquent les changements de paliers

L'analyse des données brutes ne permet pas de détecter correctement les zones de fuites artificielles activées : seule une zone a pu être repérée. La difficulté de détecter les zones de fuites est à mettre en lien avec les perturbations thermiques engendrées par la température de l'air : la fibre optique se situe à une trentaine de centimètres de la surface avec l'air. L'influence de la température de l'air masque l'influence prépondérante de la température de l'eau dans les zones de fuites.

Lorsque la fibre est positionnée sous le talus aval à faible profondeur, l'utilisation de modèles de traitements, telles que AJOUT ou MORITO, apparaît nécessaire pour détecter les fuites.



(a) Images des températures des fibres BE et ME (côté Est), les zones de fuites ne se distinguent pas.



(b) Images des températures des fibres BW et MW (côté Ouest), les zones de fuites, indiquées par des flèches, ne se distinguent pas ou très peu (RWB légèrement visible sur BW).

FIGURE 5.4.1: Pour les deux images, les valeurs des paliers de débit pour chaque fuite sont indiquées entre parenthèses en l/min.

5.4.3 Analyse AJOUT

5.4.3.1 Détection des fuites artificielles

La matrice rassemblant les valeurs du paramètre de détection d_p pour chaque jour de mesures et pour chaque capteur peut être visualisée sous forme d'image. Ce mode de représentation a d'ailleurs été choisi pour l'analyse des données amont (Fig. 5.3.2). Un autre mode de visualisation consiste à tracer la moyenne temporelle du paramètre écart pour chaque capteur, notée \bar{d}_p .

Rappelons que chaque face comprend deux séries de capteurs, l'une au niveau bas « B » (BE pour la face Est et BW pour la face Ouest) et l'autre au niveau moyen « M » (ME pour la face Est et MW pour la face Ouest). Sur chaque graphique, la position connue des zones de fuite a été ajoutée.

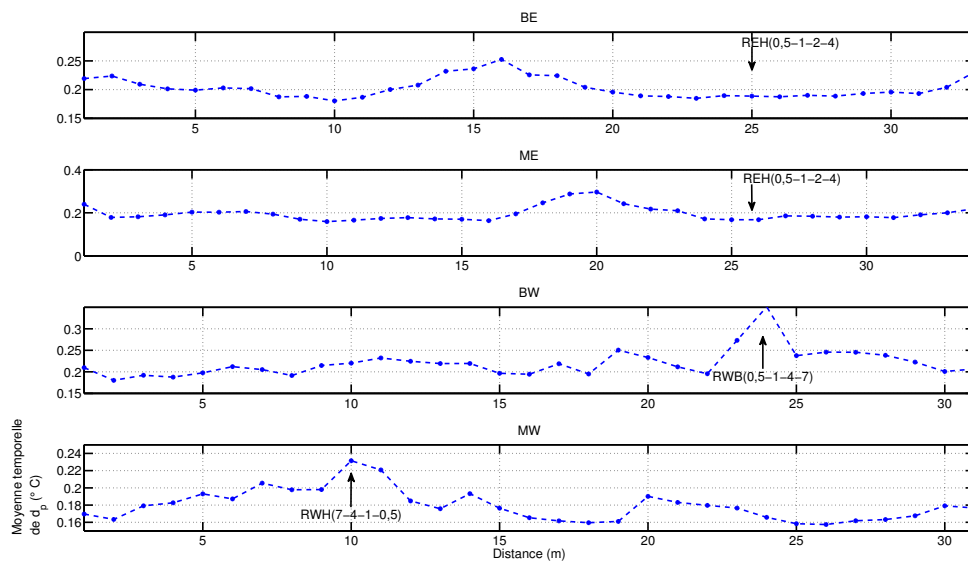


FIGURE 5.4.3: Projection du paramètre de détection \bar{d}_p pour les capteurs des fibres placées en face Est et Ouest, détection des deux fuites en face Ouest (les positions des zones de fuite sont indiquées par des flèches). Les valeurs des paliers de débit pour chaque fuite sont indiquées entre parenthèses en l/min.

En face Est, la projection du paramètre de détection \bar{d}_p ne présente aucune variation particulière dans la zone de fuite de REH. Pour BE, une zone aux alentours de 16 m est mise en évidence. Dans cette zone, des problèmes de mesures ont été constatés. Ils justifient cette hausse.

En face Ouest, les zones où \bar{d}_e atteint son maximum correspondent à des zones de fuites. Sur BW, la zone de fuite de RWB, à proximité des capteurs de BW, est mise en évidence. Cependant RWH, situé à une plus grande distance de BW, n'est pas détectée. Pour MW, on constate de la même manière que, seule la zone de fuite la plus proche des capteurs, i.e. RWH est détectée. Enfin, le contraste entre valeurs en zones de fuites et hors zone de fuite

est faible : la détection n'est pas évidente.

La détection des zones de fuites n'est donc que partielle. Seule les fuites en face Ouest ont pu être détectées. Mais la fuite haute n'a été détectée que par la fibre à hauteur moyenne et pas par la fibre du bas. La fuite basse a été détectée par la fibre au niveau bas.

5.4.3.2 Caractérisation des fuites détectées

Pour les capteurs sensibles aux zones de fuites (capteurs en face Ouest uniquement), l'évolution du paramètre de détection d_p a été étudiée (Fig. 5.4.4).

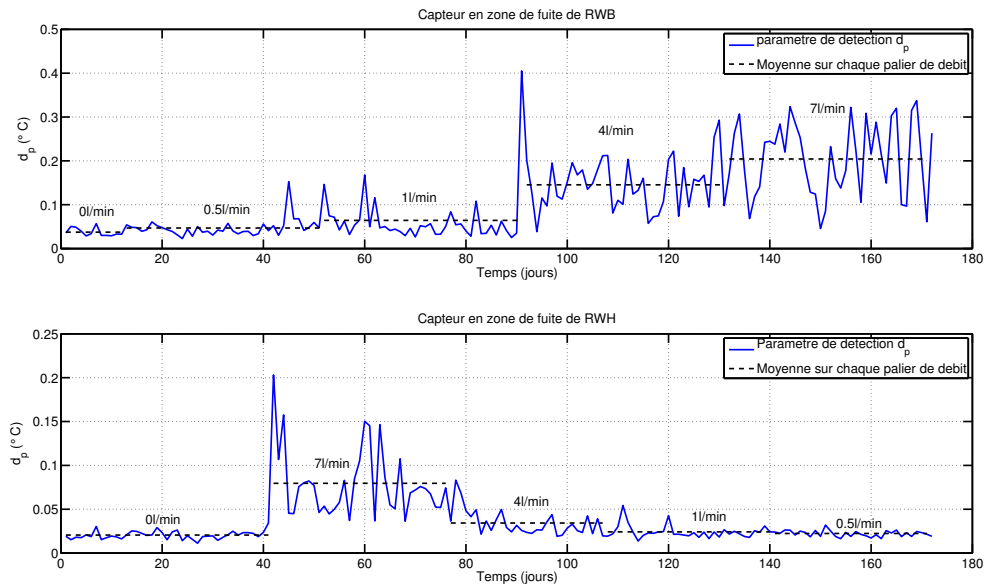


FIGURE 5.4.4: Paramètre de détection d_p obtenu pour les capteurs sensibles aux zones de fuites de RWB et RWH, corrélation entre la moyenne du paramètre de détection calculée pour chaque palier et le débit de fuite injecté

Pour chaque palier de débit, la moyenne temporelle de d_p a été calculée. Pour le capteur en zone de fuite de RWB, la moyenne de d_p augmente au fil du temps. Pour celui en zone de fuite de RWH, la moyenne augmente soudainement, au deuxième palier, puis diminue. L'évolution de la moyenne du paramètre de détection d_p est à mettre en relation avec l'évolution des débits injectés : ils augmentent avec le temps pour RWB et diminuent pour RWH. Ces observations indiquent que d_p est bien corrélé avec le débit injecté et donc avec la vitesse de fuite.

Les valeurs de d_p pour les deux capteurs en zone de fuite présentent une forte dispersion. Cette dispersion tend à augmenter avec le débit. Le coefficient de corrélation entre l'amplitude journalière de température de l'eau injectée et le paramètre de détection d_p a été calculé pour chaque palier de débit. Les résultats pour un capteur en zone de fuite de RWB sont présentés (Fig. 5.4.5). La corrélation est d'autant plus élevée que le débit est important. Pour les deux derniers paliers de fuites, où le débit injecté est de 4 l/min et 7 l/min, la corrélation est respectivement de 0,7 et 0,86. Comme pour le programme amont, les fortes variations du

paramètre de détection pour ces paliers sont liées aux variations d'amplitude journalière de la température de l'eau injectée.

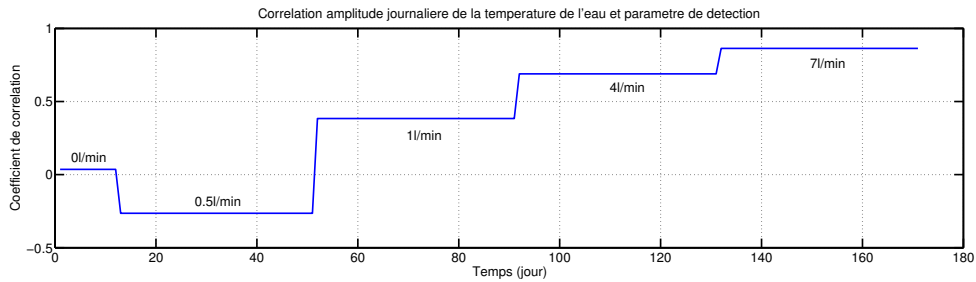


FIGURE 5.4.5: Coefficient de corrélation obtenu pour chaque palier de débit entre l'amplitude journalière de température de l'eau injectée et le paramètre de détection d_p pour un capteur en zone de fuite de RWB

5.4.4 Analyse MORITO

5.4.4.1 Analyse globale des mesures

MORITO1-air a été appliqué aux données de l'ensemble de la période d'essais (de novembre 2009 à mai 2010). Pour la détection, la température de l'air a été utilisée comme variable d'entrée.

Les valeurs du paramètre écart d_e obtenues pour les capteurs de MW et BW sont présentées Fig. 5.4.6.

Pour MW, d_e est compris entre 0,19°C et 0,28°C. Les variations de d_e d'un capteur à l'autre sont faibles. Des variations légèrement plus importantes sont constatées pour les capteurs de 3 m à 6 m : dans cette zone d_e baisse de 0,1°C. La zone de fuite de RWH a été précisée sur la graphique. A cet endroit, le paramètre écart d_e atteint son maximum mais la valeur de ce maximum ne se détache pas franchement des valeurs relevées pour les autres capteurs : l'analyse de d_e pour MW ne permet pas de détecter la zone de fuite de RWH.

Le tracé de d_e pour les capteurs de BW fait apparaître trois zones singulières pour lesquelles le paramètre écart d_e augmente significativement (Fig. 5.4.6-bas). En dehors de ces zones, les valeurs de d_e oscillent entre 0,2°C et 0,26°C. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues pour l'ensemble des capteurs de MW. Parmi les trois zones singulières, deux ont pu être identifiées par recoupement spatial : la zone aux alentours de 10 m correspond à la zone de fuite de RWH et celle vers 24 m à la zone de fuite de RWB. La zone singulière, comprenant essentiellement le capteur à 7 m, a un d_e d'intensité comparable aux deux autres, i.e. proche de 0,5°C. Entre le 4 décembre et le 25 décembre 2009, la température de ce point est restée de manière inexplicable supérieure de 0,5°C à la température des points voisins. Ce comportement justifierait le pic de d_e constaté.

Finalement l'application de MORITO1-air aux données de l'ensemble de la période d'es-

sais a permis la détection des deux zones de fuite. Cette détection a été possible uniquement à partir des données de BW. Le paramètre écart d_e pour les capteurs de MW ne met pas en évidence la zone de fuite de RWH. Rappelons qu'il n'est pas étonnant que MW ne soit pas sensible à la zone de fuite de RWB : les capteurs de MW sont situés au-dessus de la zone de fuite.

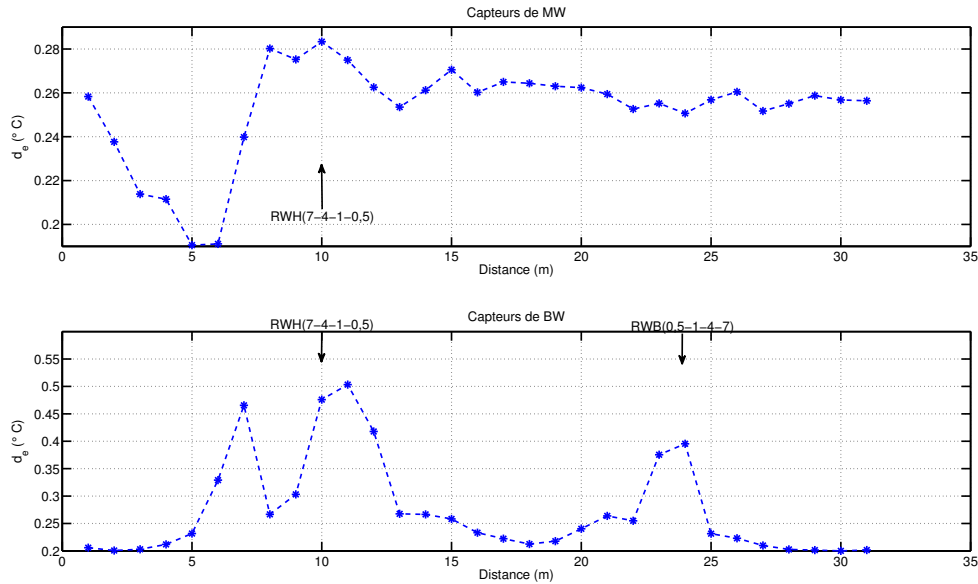


FIGURE 5.4.6: Paramètre écart d_e de MORITO1-air appliqué sur les données de l'ensemble de la période d'essais pour chaque capteur de MW et BW

Signalons qu'une analyse similaire a été effectuée pour les capteurs de ME et BE, situés en face Est. Cependant, tout comme AJOUT, MORITO ne met pas en évidence la zone de fuite de REH (seule fuite activée sur cette face). Les résultats d'analyse ne seront donc pas présentés pour ces fibres.

5.4.4.2 Analyse fractionnée des mesures

Détection et caractérisation des fuites Durant la période d'essais, trois fuites artificielles ont été activées : une en face Est, REH et deux en face Ouest, RWH et RWB.

Les dates de changements de débit sont différentes pour RWH et RWB (Fig. 5.4.7). Les paliers de débit de RWH seront notés de H1, H2, H3 H4. Ceux de RWB seront notés B1, B2, B3 et B4. Par la suite nous désignerons par « Palier 0 », la durée pendant laquelle le débit de RWH était nul.

5. TEST DES MODÈLES DE CARACTÉRISATION DE FUITES SUR DES DONNÉES SEMI-CONTRÔLÉES ISSUES DE LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE PEERINE

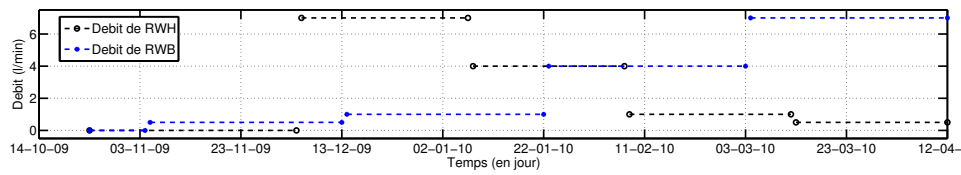


FIGURE 5.4.7: Les paliers de débit imposés pour les deux fuites artificielles activées en face Ouest : RWH et RWB.

La fuite en face Est n'a pu être détectée par le modèle MORITO1-air appliqué sur les différents paliers de débit de REH. Il ne sera plus fait référence à la face Est dans la suite de cette analyse.

En face Ouest, nous disposons de données provenant de deux séries de capteurs :

- les capteurs de la fibre niveau bas : BW
- les capteurs de la fibre niveau moyen : MW

MORITO1-eau a été appliqué dans un but de quantification sur les données de BW et MW et ce pour chaque palier de débit. La température de l'eau du bassin a été utilisée comme variable d'entrée. Les paliers relatifs à BW ne comportent pas de « palier 0 ». La période de mesures, durant laquelle le débit d'injection de RWB était nul, était trop courte pour appliquer MORITO1-eau.

Sur BW et MW, le paramètre écart d_e fluctue entre 0,1°C et 0,3°C. Aucune variation particulière n'est constatée dans les zones de fuites de RWH et RWB (Fig. 5.4.8).

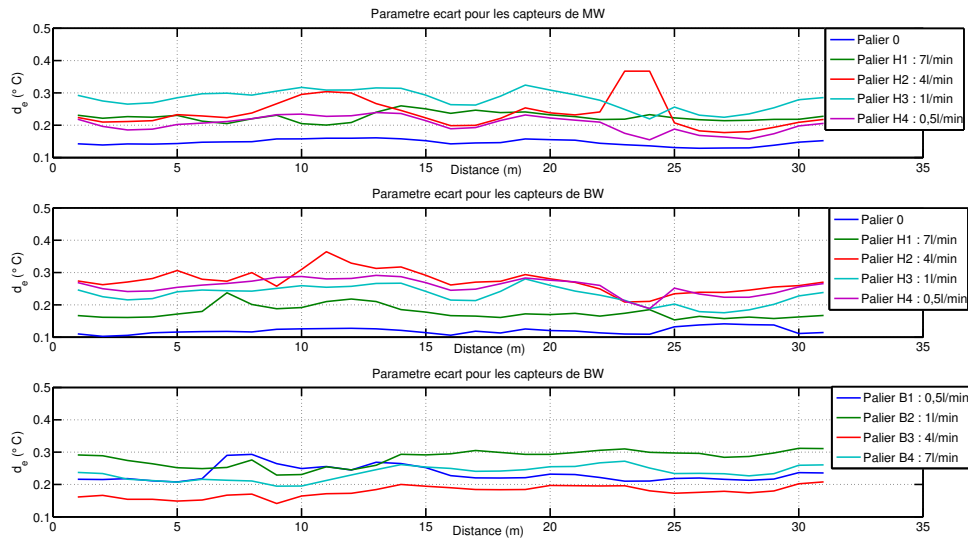


FIGURE 5.4.8: Paramètre écart d_e pour chaque capteur de MW et BW et chaque palier de débit (ceux relatifs à RWH et à RWB)

Nous avons poursuivi l'analyse en étudiant les variations du retard estimé par le modèle, appelé temps retard et noté t_r (§4.1.3.3). Rappelons que le temps retard t_r correspond au temps d'arrivée du maximum de la fonction impulsionnelle identifiée. En théorie, t_r est lié au temps de transport par diffusion et par advection de l'information thermique. En zone de fuite, t_r est a priori fortement corrélé au temps de transit de l'écoulement du bassin au capteur. De plus l'information thermique sera perçue d'autant plus rapidement que l'écoulement est fort. En zone de fuite, on s'attend à un temps retard plus faible.

Pour mettre plus facilement en évidence les zones de fuite, l'inverse du temps retard estimé t_r^{-1} a été tracé pour chaque capteur et chaque palier de fuite (Fig. 5.4.9).

Pour les capteurs de MW (Fig. 5.4.9-Haut), une zone se détache nettement au palier H1 (injection de 7 l/min). Elle est également légèrement visible au palier H2 (injection 4 l/min). Cette zone correspond à la zone de fuite de RWH. La zone de fuite de RWB n'est pas mise en évidence : ce constat n'est pas surprenant car les capteurs de MW se situent au-dessus de la zone de fuite de RWB.

Pour BW (Fig. 5.4.9-Bas), des estimations de t_r ont été faites pour chacun des paliers de RWH et RWB. BW, de par sa position, peut être sensible aux deux zones de fuites. Les estimations de t_r faites sur les paliers de RWH (graphique gauche) mettent en évidence deux zones. La première aux alentours de 10 m n'est visible qu'au palier H1. Cette position correspond à la zone de fuite de RWH. A ce palier, le débit injecté dans RWH est à son maximum : 7 l/min. L'autre zone mise en évidence se situe autour de 24 m. Au capteur situé à 24 m, t_r^{-1} augmente significativement pour les paliers H2 à H4. Cette zone correspond à la zone de fuite de RWB. Durant les paliers H2 à H4, le débit de RWB augmente de 1 l/min à 7 l/min en passant par 4 l/min. La hausse de t_r^{-1} semble liée à l'augmentation de débit. Seule une zone à 24 m est mise en évidence par les estimations de temps retard faites sur les paliers de RWB (graphique droit). A nouveau, cette zone correspond à la zone de fuite de RWB. L'inverse du temps retard estimé augmente significativement pour les paliers B3 et B4. Notons que sa valeur au palier B4 est supérieure à celle au palier B3. A ces paliers, le débit injecté dans RWB atteint ses plus fortes valeurs : 4 l/min pour B3 et 7 l/min pour B4. Les variations soudaines de t_r sont corrélées avec les variations de débit.

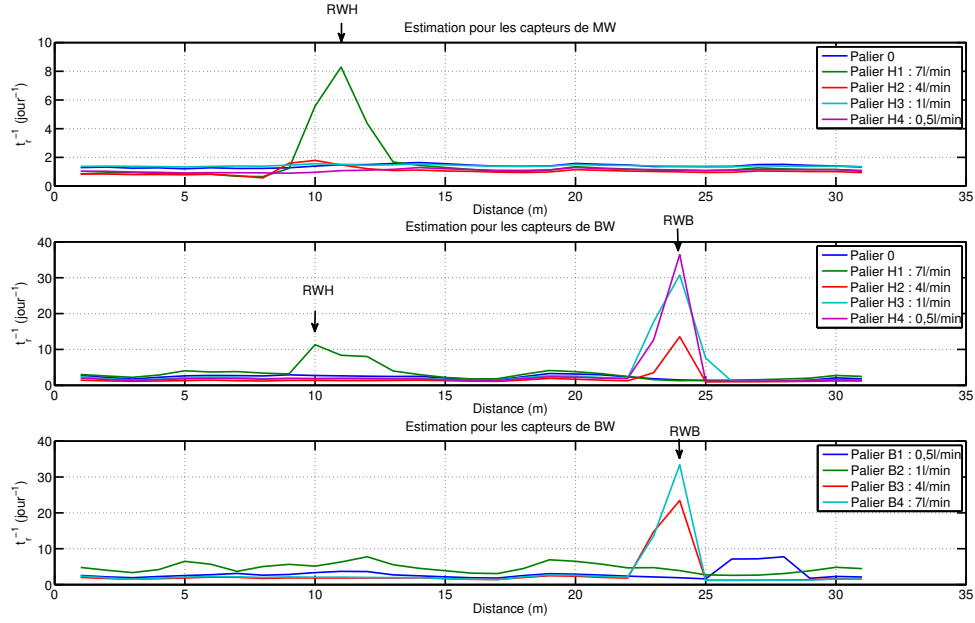


FIGURE 5.4.9: Inverse du temps retard estimé par MORITO t_r^{-1} pour les capteurs de MW et BW et chaque palier de débit (ceux relatifs à RWH et à RWB), mise en évidence des zones de fuites et sensibilité aux variations de débit.

Estimation de vitesses de fuites Un calcul similaire à celui mené précédemment pour les données amont (Par. 5.3.3.2) peut être mené.

Pour les paliers B3 et B4, le temps retard estimé dans la zone de fuite est respectivement d'environ 1 heure et 45 minutes. Selon nos hypothèses, ce temps retard correspond au temps de parcours de l'information thermique pour aller du réservoir au capteur, situé au pied aval de la digue. Cette distance est d'environ 8,5 m. La vitesse de déplacement de l'information thermique v_t est donc respectivement de $2,4 \cdot 10^{-3}$ m/s et $3,1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Cette vitesse peut être reliée à la vitesse d'écoulement notée v_f (Eq. 2.2.2) :

$$v_t = \frac{(\rho c_p)_w}{(\rho c_p)_{sol}} \cdot v_f \quad (5.4.1)$$

Les valeurs utilisées précédemment pour $(\rho c_p)_w$ et $(\rho c_p)_{sol}$ sont reprises :

- $(\rho c_p)_w = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
- $(\rho c_p)_{sol} = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$

Les vitesses d'écoulement estimées aux paliers B3 et B4 sont donc respectivement de $1,1 \cdot 10^{-3}$ m/s et $1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Un calcul similaire a été mené pour les capteurs en zone de fuite de RWH. L'ensemble des estimations de vitesses de fuites sont rapportées dans le tableau Tab.5.5.

Débit injecté	4 l/min		7 l/min	
	RWH	RWB	RWH	RWB
Temps retard estimé t_r (h)	13,4	1	4,3	0,75
Longueur de l'écoulement (m)	5,1	8,5	5,1	8,5
Vitesse thermique estimée v_t (m/s)	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Vitesse estimée de l'écoulement v_f (m/s)	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$

TABLE 5.5: Estimation des vitesses d'écoulement dans les zones de fuites de RWH et RWB

Validation des vitesses estimées dans la zone d'écoulement de RWB

Calcul théorique de la vitesse d'écoulement Le débit injecté Q dans la zone de fuite ainsi que la section S des zones d'écoulement sont connus. En supposant que la zone de fuite soit parfaitement homogène pour garantir une distribution uniforme des vitesses, une estimation de la vitesse théorique d'écoulement $v_{f,th}$ peut donc être facilement obtenue : $v_{f,th} = \frac{Q}{S}$. Les vitesses calculées de cette manière seront appelées vitesses théoriques. Avec cette approche, la vitesse calculée dans les zones de fuite de RWH et de RWB est, à même débit d'injection, identique : les sections d'écoulements sont de mêmes dimensions ($0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$). Ainsi, pour un débit injecté de 4 l/min, $v_{f,th} \approx 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ et pour un débit de 7 l/min, $v_{f,th} \approx 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Rappelons que les capteurs thermiques de BW sont placés à l'exutoire aval de la zone de fuite RWB. Ces capteurs sont donc traversés par un écoulement de vitesse identique à celui en zone de fuite. Pour RWH, la situation est différente. Aucun capteur n'est situé à l'extrémité aval de la zone de fuite. Les capteurs les plus proches sont ceux de MW situés en contrebas de l'exutoire de la zone de fuite. Un filtre est disposé au sortir de la zone de fuite. Au-dessus du filtre repose la recharge en gravier, en-dessous se trouve le corps de digue en limon argileux. L'écoulement provenant de la zone de fuite suit la ligne de pente du corps de digue à travers le géotextile et une partie de la recharge. Dans ces conditions, on imagine que la vitesse de l'écoulement traversant les capteurs de MW est différente de celle de la zone de fuite.

Par conséquent, le calcul théorique de la vitesse d'écoulement dans les zones de fuites constitue une bonne approximation de la vitesse « mesurable » par BW. Cette approche est cependant inadaptée pour les capteurs de MW.

Mesure de la vitesse d'écoulement Alors que le débit injecté dans RWB était de 10 l/min, une mesure du temps de parcours de l'écoulement à travers la zone de fuite a été réalisée. Un traceur coloré, de la fluorescéine, a été déversé dans l'eau d'injection. L'apparition de l'eau colorée à l'aval de la zone de fuite de RWB a été surveillée. Le temps séparant l'injection en amont de l'apparition du traceur en aval constitue une bonne approximation du temps de parcours mis par l'écoulement pour traverser la zone de fuite de RWB. A 10 l/min,

ce temps était d'environ 30 minutes. Connaissant la distance de parcours, environ 8,50 m, une vitesse moyenne de traversée $v_{f,m}$ peut être calculée : à 10 l/min, $v_{f,m} = 4,7 \cdot 10^{-3}$ m/s. La vitesse obtenue sert de référence pour calculer des vitesses moyennes d'écoulement à travers RWB pour d'autres débits. Par proportionnalité, à 4 l/min, $v_{f,m} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ m/s et à 7 l/min, $v_{f,m} = 3,3 \cdot 10^{-3}$ m/s. Les valeurs de vitesse obtenues pour d'autres débit seront appelées « vitesses mesurées ». Une telle mesure de la vitesse d'écoulement n'a pu être réalisée pour RWH.

Comparaison des vitesse estimées, mesurées et théoriques L'ensemble des valeurs de vitesse d'écoulement obtenues pour la zone de fuite de RWB est récapitulée dans le tableau Tab. 5.6. Ces valeurs sont toutes du même ordre de grandeur. Les estimations de vitesse faites à partir de MORITO sont tout à fait pertinentes. D'une part elles sont cohérentes : les valeurs de vitesse obtenues pour un débit de 7 l/min sont plus importantes que celles obtenues pour un débit de 4 l/min, d'autre part, elles se situent entre les valeurs de vitesse théorique et de vitesse mesurée. On constate que les valeurs de vitesse mesurée sont environ deux fois plus importantes que celles de vitesse théorique. Il est possible que les vitesse mesurées soient légèrement surestimées. Ces vitesses sont basées sur la mesure du temps d'apparition du traceur. Or le transfert de l'espèce chimique d'amont en aval est assurée pour l'essentiel par l'écoulement mais aussi par des phénomènes de diffusion et dispersion. Du fait de ces derniers, une partie des molécules injectées voyagent plus rapidement que l'écoulement. Pour une estimation plus juste de la vitesse moyenne de l'écoulement avec cette technique, il faudrait suivre, au cours du temps, l'évolution de la concentration en traceur à l'aval de la zone de fuite. Le temps correspondant au maximum de concentration mesuré est une meilleure approximation du temps de parcours moyen de l'écoulement.

Débit injecté	4 l/min	7 l/min
Vitesse théorique $v_{f,th}$ (m/s)	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Vitesse mesurée $v_{f,m}$ (m/s)	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
Vitesse estimée par MORITO v_f (m/s)	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$

TABLE 5.6: Comparaison des vitesses estimées par MORITO avec les vitesses théoriques et mesurées

Conclusion

Dans un premier temps, deux programmes d'essais ont été mis en place. Chaque programme intégrait une variation par palier du débit injecté dans les fuites artificielles et un enregistrement continu des températures au niveau des fibres optiques. Le premier programme, le programme amont, concernait les fuites à travers le masque amont et leur suivi par la fibre amont. Le second, le programme aval, concernait les fuites à travers le remblai et leur suivi par la fibre aval.

Concernant le programme amont, AJOUT et MORITO ont permis de détecter efficacement les deux zones de fuites. AJOUT a montré une sensibilité aux variations de débit de fuites : le paramètre de détection du modèle est corrélé au débit injecté. La version de MORITO utilisant l'approximation irfa2 comme fonction impulsionnelle s'est avérée inadaptée et l'identification de la fonction impulsionnelle problématique. Il semblerait que pour l'analyse des données d'un capteur thermique situé sous un parement amont, l'approche exponentielle, soit plus adaptée. En effet, ce type de fonction impulsionnelle a montré qu'une sensibilité aux variations de débit a été mise en évidence. Au cours de l'analyse des résultats du programme amont, des analyses de corrélation ont été effectuées. Cet outil statistique peut être utilisé pour l'estimation de vitesse : l'analyse de corrélation entre la température de l'eau et celle du capteur permet d'identifier un temps retard entre ces deux mesures et d'en déduire une estimation de la vitesse.

Concernant le programme aval, les zones de fuites artificielles enclenchées ont également pu être détectées par l'analyse des données de température de la fibre aval. Cependant, la détection n'a pas été aussi efficace pour les deux modèles. AJOUT n'a mis clairement en évidence qu'une seule fuite. MORITO a permis de détecter efficacement les deux fuites. Comme pour les fuites amont, AJOUT s'est montré sensible aux variations de débit de fuite. Quant à MORITO, il a permis, dans les zones de fuites, d'estimer des vitesses lorsque le débit injecté était suffisamment important : les estimations de vitesse n'ont été possible que lorsque l'écoulement dans la zone de fuite a atteint une vitesse supérieure à 10^{-3} m/s.

Évaluation des modèles de caractérisation de fuites sur site réel : la digue de Kembs

Les modèles de caractérisation de fuite, AJOUT et MORITO ont été testés sur des données issues d'un modèle numérique (Chap. 4) puis d'un modèle physique à débit contrôlé, la plateforme expérimentale PEERINE (Chap. 5). Dans ce chapitre, les modèles de caractérisation sont évalués sur des données provenant d'un site réel : la digue de Kembs située sur le Rhin, non loin de Mulhouse. A proximité de la centrale hydro-électrique de Kembs, une portion de la digue rive gauche a été instrumentée en fibre optique en 2007. Cette installation a été utilisée pour éprouver les modèles de caractérisation de fuite. Avant de pouvoir évaluer la capacité des modèles à quantifier les fuites, ces dernières doivent être détectées. Une instrumentation et des techniques spécifiques ont été mises en place au cours de la thèse pour affiner la compréhension du comportement hydraulique et thermique de la digue de Kembs, toutes deux complémentaires, pour la détection d'écoulements. Après une présentation du contexte hydraulique et thermique de l'ouvrage, les résultats des modèles AJOUT et MORITO seront exposés. Enfin, l'ensemble des informations acquises sera confrontée pour conclure quant à la performance de diagnostic des deux modèles.

6.1 Description de la digue de Kembs

6.1.1 Les aménagements hydrauliques de Kembs

Le barrage de Kembs est le premier ouvrage hydraulique situé sur le Rhin en amont de la frontière Suisse. Il dévie une partie des eaux du Rhin vers le Grand Canal d'Alsace (GCA) où sont installées 4 centrales hydroélectriques et écluses : Kembs, Ottmarsheim, Fessenheim et Vogelgrün. Le bief de Kembs sur le GCA s'étend du barrage de Kembs à la centrale hydroélectrique de Kembs (Fig. 6.1.1a). Sur ce bief, le canal d'amené se divise après six kilomètres en un canal de navigation, à l'extrémité duquel se situent les écluses de Kembs, et en un canal de force motrice acheminant l'eau vers les turbines de la centrale hydroélectrique de Kembs (Fig. 6.1.1b). Tout au long du bief de Kembs, un canal de fuite, appelé aussi contre-canal, borde les digues en rive gauche. Il collecte les eaux de fuite provenant du GCA et traversant la digue mais également de différents ruisseaux provenant de la rive gauche (plaine d'Alsace). L'ensemble de ces installations hydrauliques ont été construites entre 1929 et 1932.

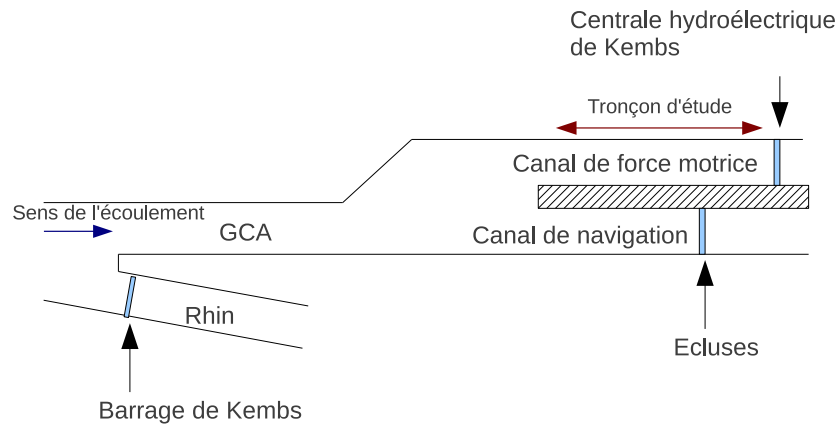
La présente étude porte sur une portion de la digue rive gauche du canal de force motrice. Cette portion, appelée par la suite « tronçon d'étude », se situe sur le premier kilomètre à l'amont de la centrale hydroélectrique de Kembs. Par simplification, le canal de force motrice sera nommé GCA (Grand Canal d'Alsace). Pour se repérer le long du GCA, nous utiliserons la mesure de Point Kilométrique (PK). Pour une position donnée le long du canal, le PK indique la distance en kilomètres séparant le point considéré de la source du fleuve. Ainsi, le tronçon d'étude se situe entre les PK178.600 (extrémité amont) et PK179.600 soit à plus de 178km de la source du Rhin.

6.1.2 Description de la portion de digue étudiée : le tronçon d'étude

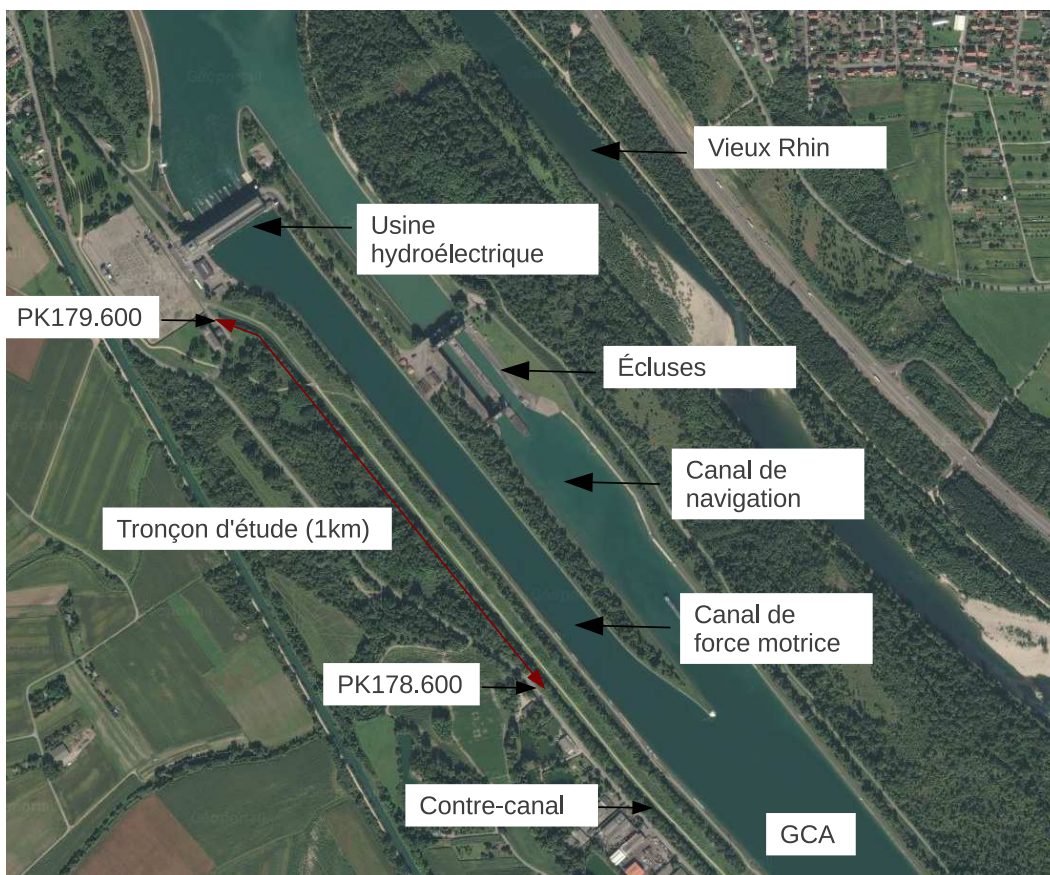
6.1.2.1 Géométrie de la digue

La section en travers de la digue de Kembs est de forme trapézoïdale (Fig. 6.1.2) d'une hauteur d'environ 13 m par rapport au plafond¹ du canal (fond du GCA). Précisons que la pente du plafond du GCA est d'environ 0,05‰. Le pied de digue aval est bordé par un contre-canal. La longueur de la digue à sa base, du plafond du GCA à celui du contre-canal, s'étend sur plus de 95 m. La crête de digue, d'environ 40 m de large, dispose d'une piste carrossable. Une piste en pied de digue, d'environ 3,50 m de large, permet l'accès au pied de digue et au contre-canal. Le contre-canal est un ouvrage de section trapézoïdale avec un plafond dont la largeur varie de 4,00 m à 4,75 m et d'une pente d'environ 0,95‰.

1. Plafond : contraction de plat-fond, le plafond désigne le fond du canal, situé entre les bases du talus qui forment les berges.



(a) Schéma explicatif du bief de Kembs



(b) Photographie aérienne du site de Kembs (Photographie provenant de Géoportail (2011))

FIGURE 6.1.1

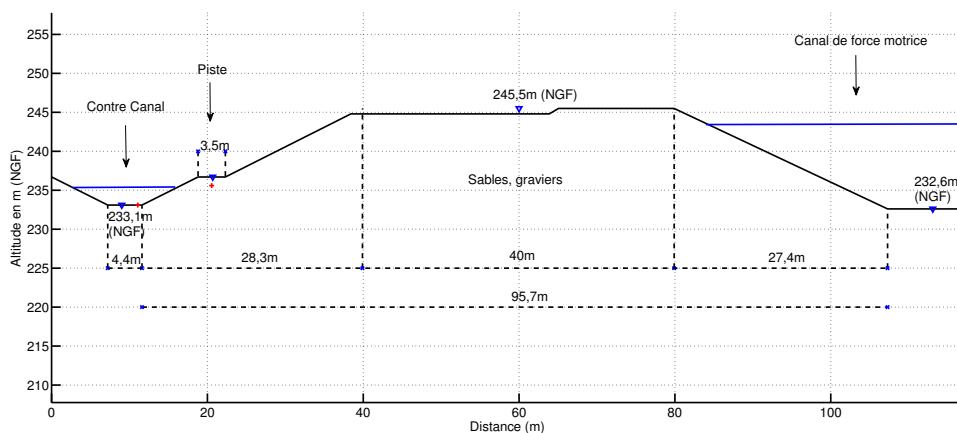


FIGURE 6.1.2: Vue en coupe de la digue de Kembs (section en travers située au PK178.600). Les croix rouges représentent la position des deux câbles contenant les fibres optiques.

6.1.2.2 Matériaux de la digue

Le corps de digue a été réalisé en tout-venant sablo-graveleux roulé de 0-200 mm de granulométrie. L'étanchéité de la digue est assurée par un masque amont constitué de dalles en béton de 12 cm d'épaisseur. Les joints entre les dalles, réalisés en mastic bitumineux, constituent l'un des points faibles de l'étanchéité : altérés, ils constituent un point d'entrée pour l'eau. Le sol de fondation est constitué d'une argile bleue compacte en profondeur, surmontée d'une couche d'une dizaine de mètres, constituée d'un mélange de gravier et de sable.

6.1.3 Dispositif de mesures

6.1.3.1 Mesures réparties de température par fibre optique

Position des fibres optiques En 2006, deux câbles contenant des fibres optiques ont été installés le long du contre-canal sur une distance d'environ mille mètres (Fig. 6.1.3). La zone instrumentée en fibre optique, couvrant l'ensemble du tronçon d'étude, se situe juste en amont de l'usine hydroélectrique de Kembs.

L'un des câbles, appelé par la suite « câble contre-canal », a été placé au pied aval de la digue, à l'intersection du talus de la digue et du plafond du contre-canal. Une recharge de gravier (40/60 mm), matériaux roulés du Rhin, a été disposé sur le câble contre-canal sur une épaisseur d'environ 10 cm. Ce matelas de gravier sert de protection mécanique.

L'autre câble, appelé par la suite « câble piste », a été disposé à 1m de profondeur sous la piste longeant le contre-canal. Le câble piste repose sur un lit de sable de 10 cm d'épaisseur. Le câble est également recouvert d'une couche de sable de 10 cm d'épaisseur.

Les câbles contre-canal et piste sont d'une longueur d'environ 950 m. Dans la suite de l'é-

tude, l'extrémité aval de chacun des câbles constituera la référence spatiale 0 m. Avec cette convention, l'extrémité amont est située à 950 m.

Pour la mesure de la température de l'eau, la fibre optique a également été utilisée : un câble contenant des fibres optiques plonge dans le GCA. Un tube creux crépiné, fixé sur le parement amont du canal, guide le cheminement du câble dans le GCA. Le câble atteint un niveau situé 2 m en-dessous de la cote normale d'exploitation du canal à 244,3 m (NGF) à proximité de l'usine. Par la suite, ce câble sera appelé « câble plongeur ».

Les câbles contre-canal et piste contiennent des fibres optiques multimodes et intègrent des câbles en cuivre utiles pour la méthode de chauffe. Dans notre étude, seules des mesures passives, i.e. les mesures naturelles de la température du sol, sans chauffe du câble optique, ont été réalisées.

Ligne optique Les câbles contre-canal, piste et plongeur, contiennent plusieurs fibres optiques. Pour chaque câble, deux fibres ont été utilisées. Ces fibres sont soudées entre elles à une extrémité du câble. Le signal optique envoyé par le DTS parcourt deux fois chaque câble : dans un sens aller et un sens retour. Ainsi, un profil « aller » et un profil « retour » de température sont disponibles pour chaque câble.

A l'autre extrémité du câble, les fibres des différents câbles sont soudées les unes entre les autres (Fig. 6.1.4). De cette manière, les fibres optiques des différents câbles sont montées en série. Au final, à partir de cette installation optique, le profil de température obtenu à chaque acquisition comporte les mesures de température aller et retour le long des câble piste, contre-canal et plongeur. Par la suite, la fibre optique utilisée pour la mesure du profil aller du câble contre-canal et piste seront appelées, fibre contre-canal et fibre piste respectivement.

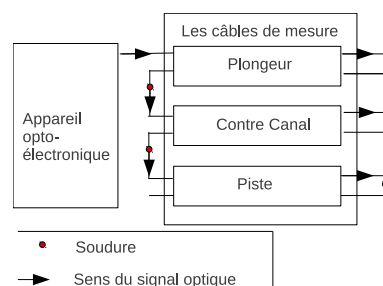
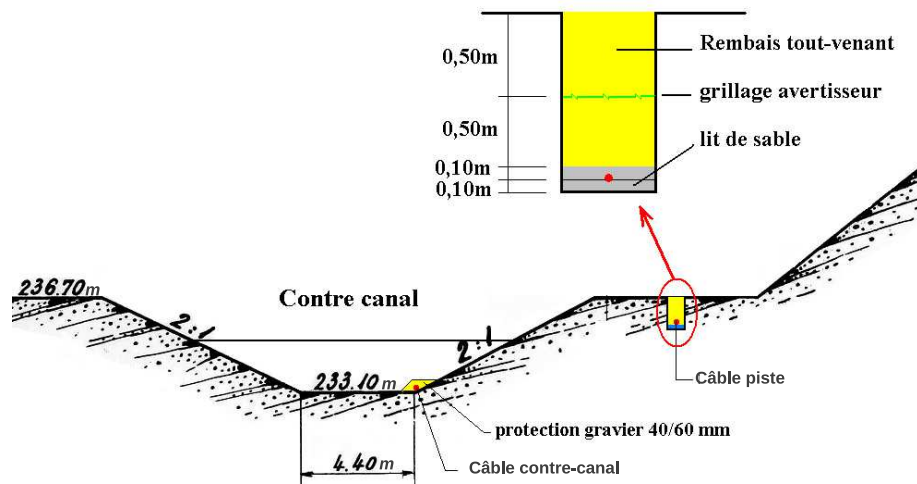
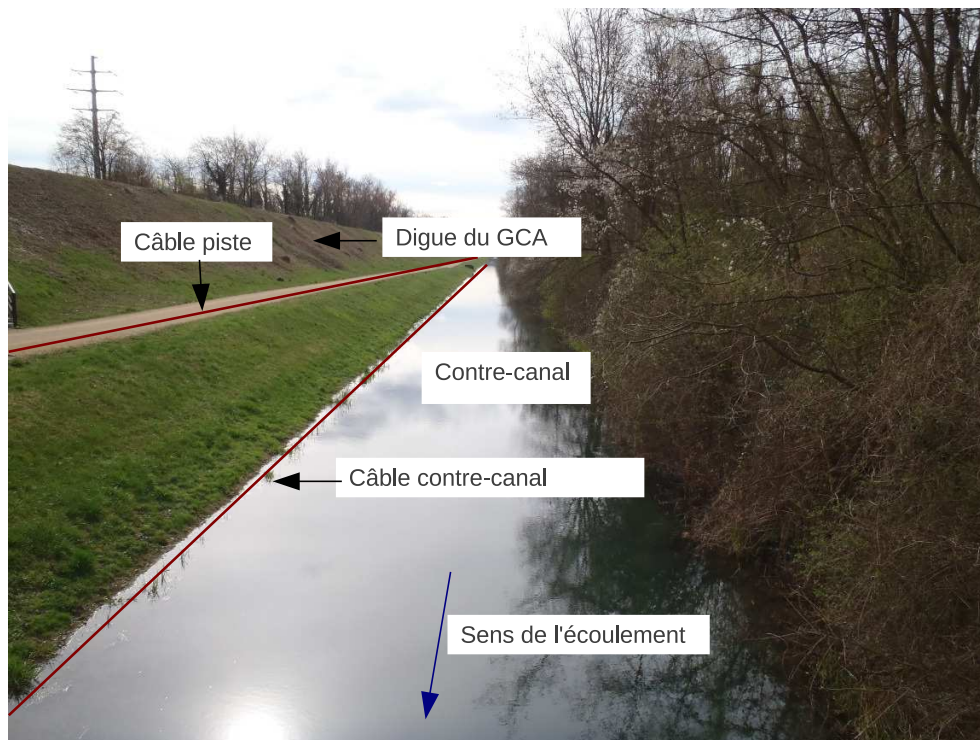


FIGURE 6.1.4: Schéma explicatif du circuit optique, montage en série par soudure optique des différents câbles

Appareil optoélectronique Les mesures de température par fibre optique ont été réalisées à l'aide d'un appareil du commerce de type Sensornet . Des acquisitions toutes les heures ont été effectuées.



(a) Vue en coupe du contre-canal (section en travers située au PK178.630), position des câbles contre-canal et piste



(b) Photographie du contre-canal, position des câbles contre-canal et piste

FIGURE 6.1.3

6.1.3.2 Mesures dans les piézomètres

Mesures d'auscultation réglementaires Pour assurer la surveillance et l'auscultation de l'ouvrage, des piézomètres sont implantés régulièrement le long de la digue (Fig. 6.1.5a).

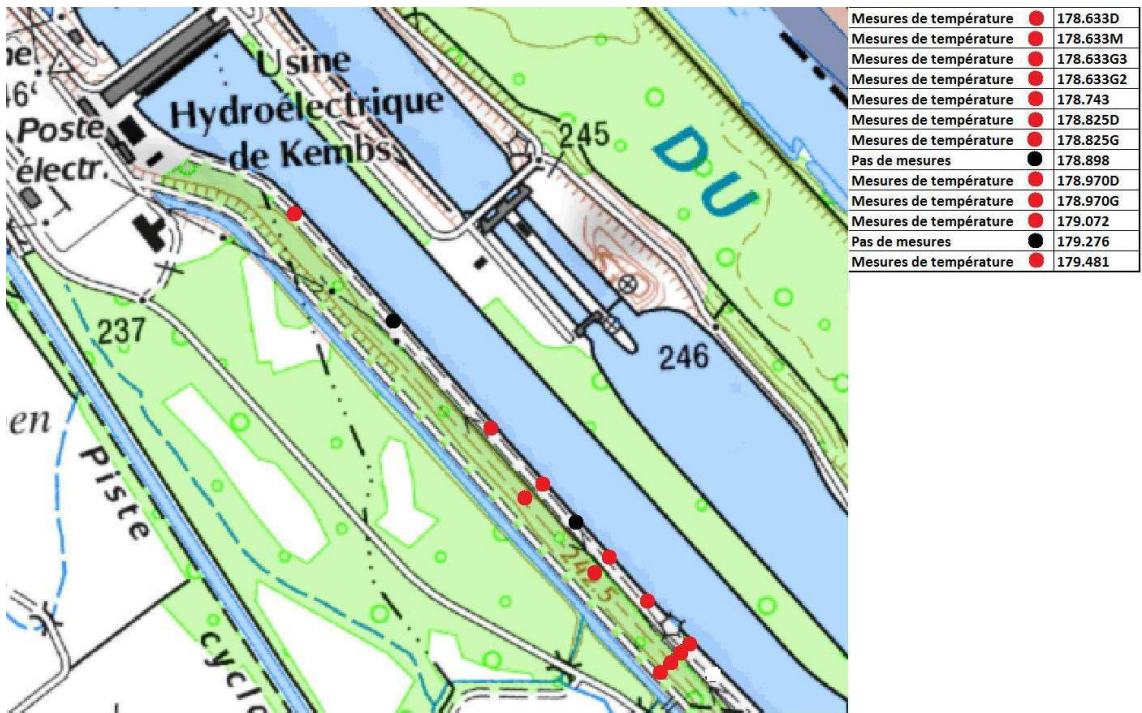
Le tronçon d'étude dénombre 14 piézomètres (Fig. 6.1.5b). La plupart sont situés en crête de digue, à l'extrémité haute du parement amont (Fig. 6.1.5a). Certains sont toujours en crête mais décalés vers le talus aval. La section en travers au PK178.633 comportent quatre piézomètres espacés d'une quinzaine de mètres. Les sections en travers qui comportent plusieurs piézomètres ont pour but de suivre la position de la ligne piézométrique. La distance séparant chaque section en travers, auscultée par un piézomètre, est comprise en 70 m et 200 m sur le tronçon d'étude. L'espacement est variable car des piézomètres ont été ajoutés depuis la construction de l'ouvrage pour des études spécifiques liées à des désordres localisés. D'ailleurs, au cours de la présente étude, un cinquième piézomètre a été ajouté à la section au PK178.633.

L'exploitant de l'aménagement hydroélectrique de Kembs assure un suivi régulier de la charge piézométrique : des mesures de niveau d'eau, mesures piézométriques, sont effectuées à la fin de chaque mois dans l'ensemble des piézomètres du dispositif d'auscultation.

Mesures de température/pression à l'aide de capteurs « marmottes » Outre la mesure de la charge hydraulique, les piézomètres peuvent être utilisés pour effectuer des mesures de température à l'intérieur de l'ouvrage. Ces informations thermiques complètent celles apportées par les fibres optiques. Ainsi, début 2010, nous avons équipé onze piézomètres du tronçon d'étude en capteurs de température. Les piézomètres équipés sont indiqués Fig. 6.1.5b. Les capteurs, attachés le long d'une corde fixée à la tête des piézomètres, ont permis d'obtenir des mesures de température à différentes hauteurs, le long des tubes piézométriques (Fig. 6.1.6). Sur chacune de ces chaînes de mesure, un capteur de pression a été ajouté à l'extrémité inférieure (i.e. au fond de chaque piézomètre). Les sondes utilisées, d'une dizaine de centimètres de long, fonctionnent sous le principe des capteurs « marmottes » : ils sont autonomes en énergie et réalisent le stockage des mesures. Une fréquence d'acquisition au pas horaire a été choisie.



(a) Piézomètres en crête de digue à l'extrémité haute du parement amont



(b) Localisation des piézomètres d'auscultation sur le tronçon d'étude avec indication de ceux équipés de sondes de température. Les piézomètres portent le nom du PK où ils se situent.

FIGURE 6.1.5

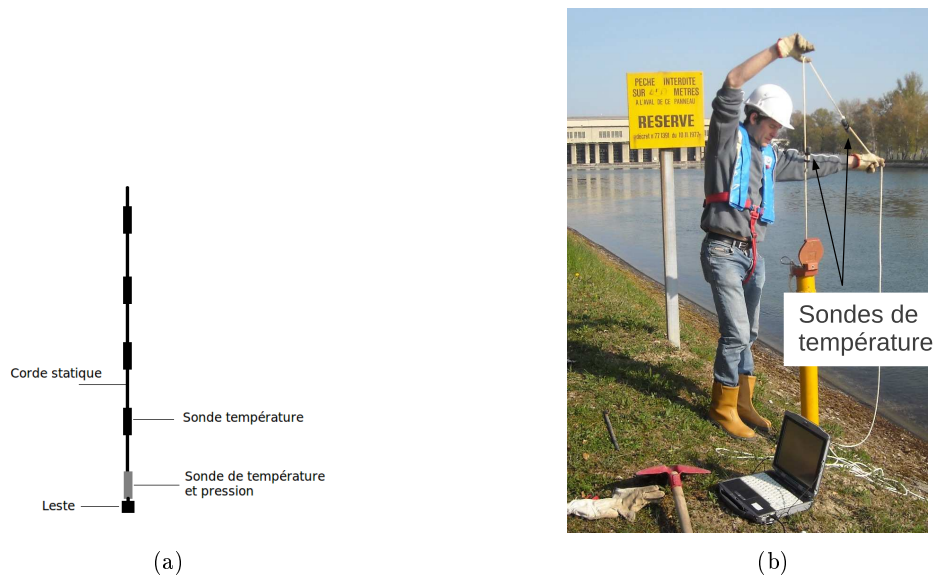


FIGURE 6.1.6: a) Schéma d'une chaîne de capteurs insérée dans un piézomètre, mesures de température à différentes hauteurs et mesures de charge hydraulique

b) Photographie d'une chaîne de capteurs insérée dans un piézomètre

Mesures de la température de l'eau du contre-canal et de l'air Trois capteurs marmottes ont été positionnés dans le contre-canal : un capteur a été placé à l'extrémité amont de le tronçon d'étude (PK178.600), un autre à l'extrémité aval (PK179.330) et un dernier à l'aval de l'arrivée d'un ruisseau dans le contre-canal (PK178.750). Du fait de cet apport d'eau, nous soupçonnions une variation de la température du contre-canal le long du tronçon d'étude. Chacun de ces capteurs a été placé sur le lit du contre-canal. Malheureusement, suite à des problèmes pour l'un et du vandalisme pour l'autre, seul le capteur à l'extrémité amont a pu être exploité. La température de l'eau du contre-canal est identifiée à la température mesurée par ce capteur bien que cette mesure ne soit pas forcément représentative de la température dans le contre-canal tout au long de la section d'étude.

Pour la mesure de la température de l'air, les données de météoFrance ont été utilisées. La station de mesure de l'aéroport Bâle/Mulhouse se situe à quelques kilomètres du site de Kembs.

6.1.4 Campagne de mesures

Les mesures de température par fibre optique exploitées dans ce travail couvrent la période de février 2010 à juin 2011. Durant cette période, d'autres mesures ou essais in-situ, hydrauliques et thermiques, ont été menés pour affiner la compréhension du comportement thermo-hydraulique du tronçon d'étude. La dénomination campagne de mesure, utilisée dans la suite de l'étude, renvoie à l'ensemble des mesures effectuées sur le site de Kembs durant la période de février 2010 à juin 2011.

6.2 Contexte hydraulique

6.2.1 Les charges hydrauliques aux frontières et dans la digue

6.2.1.1 Hauteur d'eau du Grand Canal d'Alsace (GCA)

La cote altimétrique du niveau d'eau dans le GCA est mesurée en continu au niveau de la centrale hydro-électrique de Kembs. Au cours de l'année 2010, la cote moyenne mesurée était de 244,3 m. Pour l'ensemble de cette année, l'amplitude² de variation de la cote était d'environ 18 cm. Proche de l'usine, la cote du plafond du GCA est à 232,1 m. La hauteur d'eau au cours de l'année 2010 a donc constamment oscillé autour de 12,2 m. En fait, grâce au barrage de Kembs en amont, le niveau d'eau dans le GCA est parfaitement régulé sur le bief de Kembs : les variations de cote du niveau d'eau sont donc très faibles.

6.2.1.2 Hauteur d'eau dans le contre-canal

Le contre-canal est alimenté par les fuites à travers la digue du GCA mais aussi par différents petits ruisseaux qui sont collectés dans le contre-canal. Ces apports ont un débit variable au cours de l'année. Quelques mètres à l'amont et dans le tronçon d'étude, deux ruisseaux se jettent dans le contre-canal. Le débit de ces apports représente un pourcentage significatif du débit du contre-canal : en mai 2011, nous avons réalisé des mesures de débit (Fig. 6.2.1) par profileur Doppler (Le Coz *et al.*, 2008) qui ont montré que le premier apport augmentait de 40% le débit du contre-canal et le second de 27%. Le débit du contre-canal à l'aval du deuxième apport a été estimé à $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces mesures de débit avait pour objectif initial d'estimer le débit total des fuites sur le tronçon d'étude par bilan des débits entrants et sortants du tronçon d'étude. En théorie, la différence entre le débit sortant et le débit entrant du tronçon d'étude (débit des apports compris), est égale au débit de l'ensemble des fuites sur le tronçon d'étude. La différence obtenue, $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$, est bien trop faible pour être significative : elle est inférieure à l'incertitude de la mesure.

2. Amplitude : Dans ce chapitre, le terme d'amplitude A , employé pour la description des signaux S , représente l'écart entre la valeur maximale et minimale du signal sur la période considérée : $A = S_{max} - S_{min}$.



FIGURE 6.2.1: Mesure de débit dans le contre-canal par profileur Doppler (Le Coz *et al.*, 2008)

Lors des mesures de débit, la profondeur dans le contre-canal a été évaluée entre 0,80 m et 1,30 m. Les profondeurs les plus faibles ont été mesurées avant le deuxième apport et les plus élevées après : le débit provenant du deuxième apport augmente la hauteur d'eau. Le débit du contre-canal est variable au cours de l'année. En période de hautes eaux, le débit à l'aval du 2ème apport peut dépasser $3 \text{ m}^3/\text{s}$: le débit maximal connu est de $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$. D'après nos observations, on estime que la hauteur d'eau moyenne à l'amont du 2ème apport fluctue entre 0,60 m et 1 m. Quant à celle à l'aval, elle doit osciller entre 1,10 m et 1,50 m.

De ces mesures et observations, deux caractéristiques du régime hydraulique du contre-canal sont à retenir :

la hauteur dans le contre-canal le long du tronçon d'étude n'est pas constante : elle est plus élevée en amont qu'en aval notamment en raison d'un apport de débit extérieur à 150 m de l'extrémité amont de du tronçon d'étude.

- le débit dans le contre-canal et donc la hauteur d'eau fluctuent au cours de l'année. La variabilité des apports extérieurs (ruisseaux) expliquent en partie ces fluctuations.

Les apports sur la section d'étude, de débit conséquent, sont également des sources d'influence thermique significatives. Ils peuvent avoir un effet sur les mesures de température de la fibre contre-canal.

6.2.1.3 Hauteurs piézométriques

L'analyse du niveau piézométrique renseigne sur la charge hydraulique à l'intérieur de l'ouvrage. Si l'étanchéité de l'ouvrage est parfaite, aucune connexion hydraulique n'existe entre la retenue et la nappe dans ou sous l'ouvrage.

La cote du niveau d'eau dans les piézomètres situés en crête de l'ouvrage sur le tronçon d'étude a été analysée sur la période de mesures (Fig.6.2.2(graphique du haut)). Les mesures présentées sont celles réalisées mensuellement par l'exploitant. En fonction des valeurs moyennes de niveau piézométrique, trois groupes peuvent être identifiés :

- le groupe 1 rassemble les piézomètres dont le niveau varie autour de 234 m (NGF) : P178.970D, P179.072. Ces piézomètres sont situés du côté amont du tronçon d'étude.

- le groupe 2 comprend ceux dont le niveau est proche de 235 m (NGF) : P178.633D à P178.825D. Ces piézomètres sont situés juste à l'amont des piézomètres du groupe 1.
- le groupe 3 ne comprend qu'un seul piézomètre : P179.481. Jusqu'en mars 2011 son niveau oscille autour de 235,6 m puis les derniers mois il augmente jusque 237 m (NGF) avant de redescendre à 236,5 m. Ce piézomètre est à l'extrémité aval de du tronçon d'étude.

Pour les groupes 1 et 2, les variations du niveau piézométrique sur l'ensemble de la période de mesure sont comprises entre 30 cm et 1 m. Pour le groupe 3 (P179.481), les variations sont supérieures, elles atteignent 1,60m, en raison de la hausse du niveau sur les trois derniers mois de mesure. Pour ce piézomètre, nous avons constaté lors de nos visites, qu'un bruit d'écoulement était audible dans celui-ci, manifestement traversé par un écoulement non négligeable. Globalement, l'évolution du niveau piézométrique pour chacun des groupes est similaire, exception faite des derniers mois de mesures de P179.481.

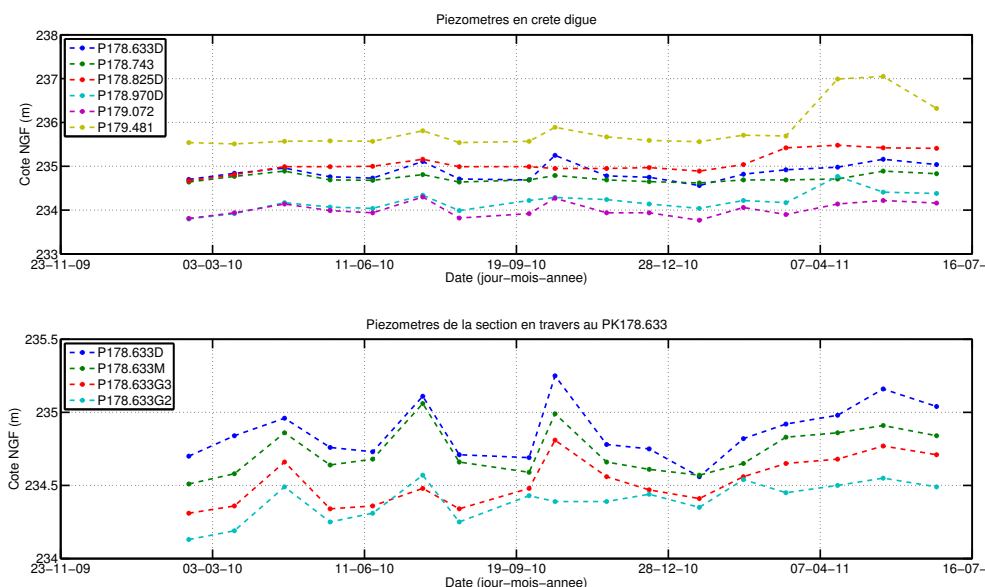


FIGURE 6.2.2: Niveaux piézométriques référencés en cote NGF dans les piézomètres en crête de digue (graphique du haut) et ceux dans la section en travers au PK178.633 (graphique du bas)

Ce regroupement par niveau piézométrique moyen montre que la charge hydraulique est la plus importante à l'extrémité aval du tronçon d'étude (Fig. 6.2.2). A l'autre extrémité, elle est inférieure d'un mètre en moyenne (excepté les trois derniers mois de mesures) et reste relativement stable sur environ 200 m, distance séparant les piézomètres extrêmes du groupe 2. Enfin, la charge hydraulique atteint ses valeurs minimales vers le milieu du tronçon d'étude : elle est relativement stable sur une zone de 100 m. Ces observations sont résumées graphiquement (Fig. 6.2.3) : la cote indicative du niveau piézométrique de chaque groupe y est présentée. Bien évidemment, ces conclusions sont limitées par le pas spatial des mesures :

les piézomètres sont séparés de 70 m à plus de 400 m.

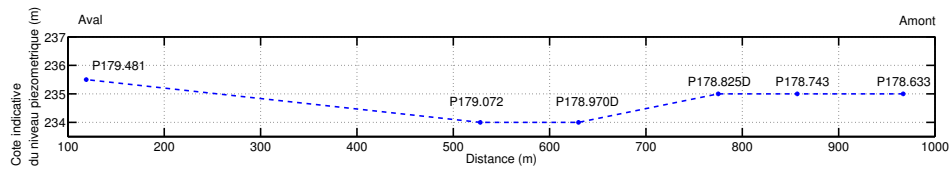


FIGURE 6.2.3: Cote indicative du niveau piézométrique dans les piézomètres situés en crête du tronçon d'étude

Parmi les piézomètres étudiés, seul P179.481, présente une cote piézométrique supérieure à 235,7 m (NGF). La fibre optique piste est située à cette cote. Ainsi, d'après la piézométrie, il semblerait que la fibre piste soit au-dessus de la nappe d'écoulement sur la quasi-totalité du tronçon d'étude. Cet éloignement de la nappe diminue la capacité de sensibilité aux fuites de la fibre piste.

6.2.1.4 Hauteur piézométrique dans la section en travers au PK178.633

Au début de la campagne de mesures, la section en travers au PK178.633 était équipée de quatre piézomètres. Un cinquième piézomètre a été ajouté au cours de la campagne de mesures (Fig. 6.2.4) : P178.633G1. Cependant, pour ce piézomètre, nous ne disposons pas de données exploitables. Seules celles des quatre autres seront présentées.

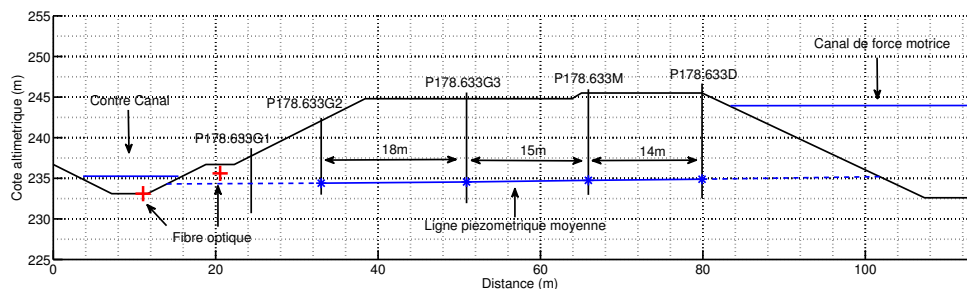


FIGURE 6.2.4: Positionnement des piézomètres dans la section au PK178.633, de la ligne piézométrique moyenne (moyenne des données sur la période de la campagne de mesures) et des fibres optiques.

L'évolution du niveau piézométrique est similaire pour l'ensemble des piézomètres (Fig. 6.2.5a) : les hausses de niveau constatées dans le piézomètre le plus proche du contre-canal se retrouvent en grande partie dans les autres piézomètres. Remarquons que la fibre optique située sous la piste est située au-dessus du niveau moyen piézométrique.

Sur l'ensemble de la période de mesures (excepté pour un point), les valeurs du niveau piézométrique pour chaque mois sont ordonnées : elles sont d'autant plus faibles que le pié-

zomètre est proche du talus aval (Fig. 6.2.2b). Cet ordonnancement traduit la décroissance de la charge hydraulique au fur et à mesure que l'on se déplace vers le talus aval.

Ces mesures de niveau piézométrique donnent accès à une estimation du gradient hydraulique. Le gradient hydraulique est une mesure de la différence de charge hydraulique entre deux points rapportés à la distance les séparant³. Deux calculs de gradients ont été effectués :

- un calcul fractionné : le gradient hydraulique a été calculé entre deux piézomètres successifs (Fig. 6.2.5a)
- un calcul global : le gradient hydraulique moyen a été calculé entre les deux piézomètres extrêmes, P178.633D le plus proche du GCA et P178.633G2, le plus éloigné du GCA. (Fig. 6.2.5b)

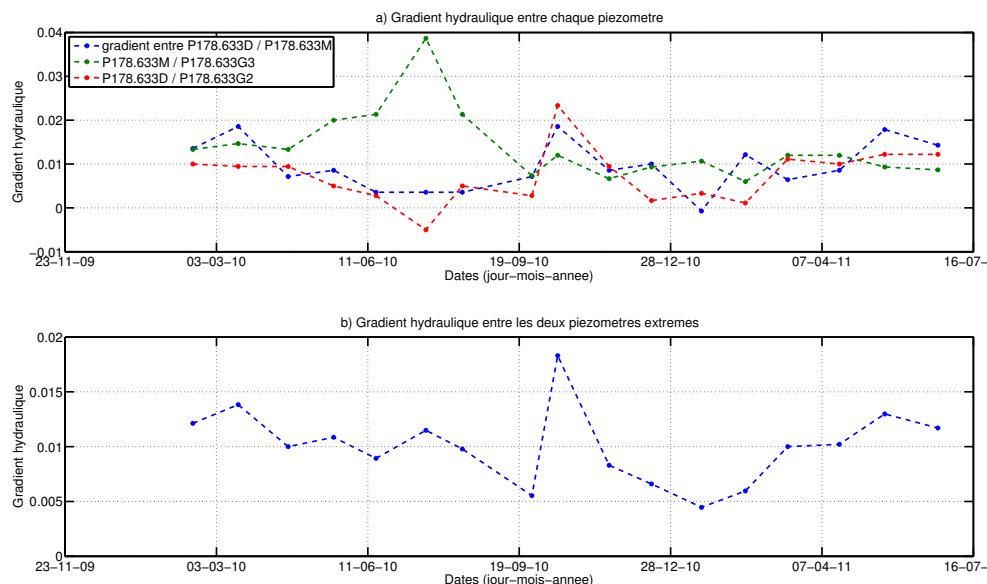


FIGURE 6.2.5: a) Gradient hydraulique calculé entre deux piézomètres successifs
b) Gradient hydraulique calculé entre deux piézomètres extrêmes : P178.633D et P178.633G2

Concernant les gradients hydrauliques obtenus par calcul fractionné (Fig. 6.2.5(haut)), le gradient hydraulique entre P178.633M et P178.633G3 est significativement plus élevé durant les 4 mois répartis entre mai et août 2010. Au mois de juillet de cette période, le gradient entre P178.633G3 et P178.633G2 est négatif : lors de ce relevé, le niveau piézométrique mesuré dans P178.633G2 était de 10 cm plus élevé. Avant de conclure par une inversion du sens de l'écoulement à cette date, il est judicieux de mettre en rapport ce faible écart avec l'incertitude de mesure du même ordre de grandeur. Tout du moins on en conclura que lors de cette mesure, la différence de niveau entre ces deux piézomètres était très faible. Sur le

3. La différence est faite dans ce sens : entre le point le plus proche du GCA et le point le plus éloigné.

reste de la période de mesures, les gradients hydrauliques sont proches et varient entre 0 et 0,02.

Concernant le gradient hydraulique global, calculé entre P178.633D et P178.633G2 (Fig. 6.2.5(bas)), son évolution est comprise entre 0,005 et 0,02.

6.2.2 Repérage des fuites par examen visuel

Au cours de la campagne de mesure, sept examens visuels de la berge rive droite du contre-canal ont été réalisés. Les examens ont consisté en une observation fine du pied de talus aval de la digue.

Juste à l'amont du tronçon d'étude, des dalles en béton ont été ajoutées sur les berges du contre-canal sur une longueur d'environ 50 m, probablement pour stabiliser les berges. Une fuite localisée au niveau de la jonction de deux dalles a été repérée (Fig. 6.2.9a). Cet événement est signalé car, à la plupart de nos visites, cette fuite a été observée. Elle atteste de la présence d'écoulement venant de la digue. Du fait de sa localisation, cette fuite apparaît clairement : les dalles de béton canalisent les écoulements de fuite vers le joint défectueux. Signalons qu'aux périodes de hautes eaux du contre-canal, la fuite est « noyée » sous l'écoulement du contre-canal. En février 2010, des mesures de température dans l'écoulement de la fuite ont montré un contraste important de température avec celle de l'eau du contre-canal. A l'exutoire de la fuite, la température était de 5,1°C soit environ trois degrés de moins que celle relevée dans le contre-canal : 8,0°C. Ce même jour, la température du GCA était d'environ 4,4°C. Un rapprochement intéressant est à faire entre la température du GCA et celle de la fuite. Ce suivi thermique a été mené pour l'ensemble des inspections visuelles (Fig. 6.2.6). La température de la fuite est plus proche de celle du GCA que de celle du contre-canal (excepté pour la mesure de juin 2010). D'après ces observations, la température de la fuite et celle du GCA apparaissent liées. L'écart, parfois très faible, de l'ordre de 1% à 2% pour les mesures de juillet 2010 et juin 2011, semble indiquer un écoulement de vitesse non négligeable : suite à la traversée de l'ouvrage de plus de 90 m, la température de l'eau en provenance du GCA a peu varié.

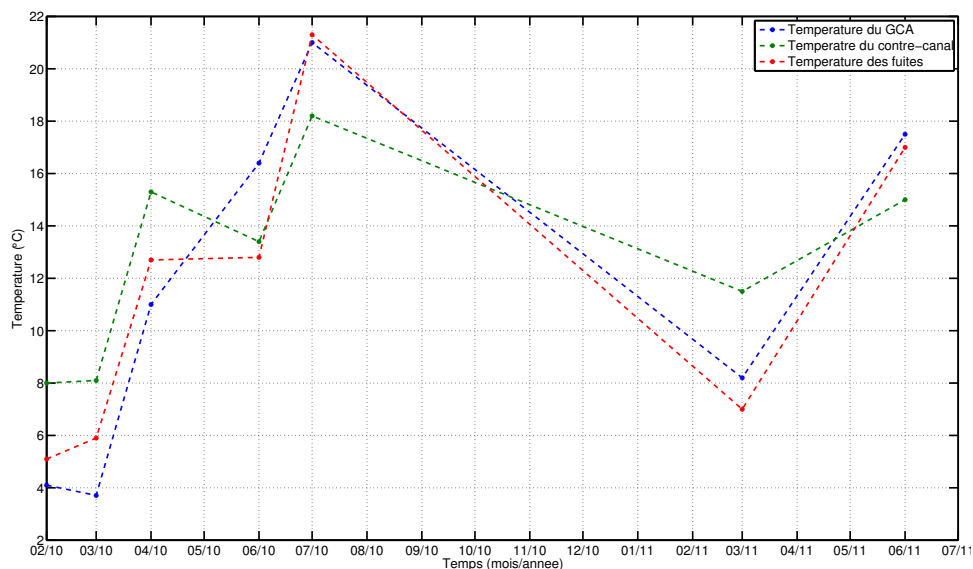


FIGURE 6.2.6: Comparaison de la température mesurée dans le GCA, le contre-canal et la fuite entre les dalles, la température de la fuite présente un lien avec celle du GCA.

Pour les autres fuites, un tel suivi thermique n'a pu être mis en œuvre. Le nombre et la position des fuites varient avec le temps. En 2008-2009, les fuites repérées avaient été référencées par GPS. A chacune des trois inspections visuelles réalisées, le nombre et la position des fuites sont différents (Fig. 6.2.8). Bien évidemment ce recensement n'est pas exhaustif. Deux facteurs limitent particulièrement la détection des fuites par examen visuel : le niveau d'eau dans le contre-canal et la végétation des berges et du contre-canal (Fig. 6.2.7). Lorsque la hauteur d'eau est importante dans le contre-canal, les fuites débouchent sous la surface du contre-canal et ne sont donc plus visibles. Quant à la végétation, elle masque le pied des berges, lieu d'arrivée des fuites.

Précisons que le référencement par GPS n'a pu être poursuivi durant la campagne de mesures.



FIGURE 6.2.7: Photographie du pied de talus aval, la végétation gêne l'examen visuel pour la détection des fuites à ce niveau.

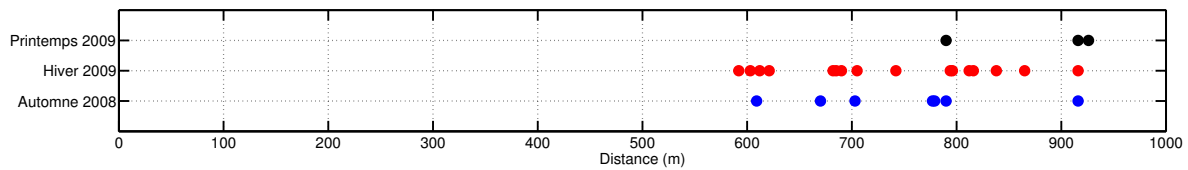


FIGURE 6.2.8: Position des fuites repérées en 2008/2009, le nombre et la position des fuites fluctuent au cours du temps

Le pied de talus aval est généralement constitué de matériaux granulaires ou limoneux déposés par l'écoulement du contre-canal. Au niveau de certaines zones de fuites repérées, en particulier sur les cents premiers mètres amont du tronçon d'étude, ces matériaux fins sont absents. L'écoulement de fuite a très certainement contribué à lessiver de particules fines le matériau du pied de digue aval. La photographie Fig. 6.2.9b donne un exemple de ce type de fuite. L'eau du contre-canal apparaît verdâtre : elle avait été colorée pour faire apparaître un contraste entre l'écoulement du contre-canal et celui des zones de fuites.

Ces inspections visuelles ont permis de mettre en évidence une zone de fuite récurrente. Elle s'étend sur environ 70m à partir de l'extrémité amont du tronçon d'étude. D'ailleurs, sur cette zone et uniquement sur celle-ci, le matériau en pied de talus est majoritairement constitué de gros graviers, signe de lessivage.



(a) Fuite récurrente, repérée à la jonction de deux dalles du contre-canal juste à l'amont du tronçon d'étude

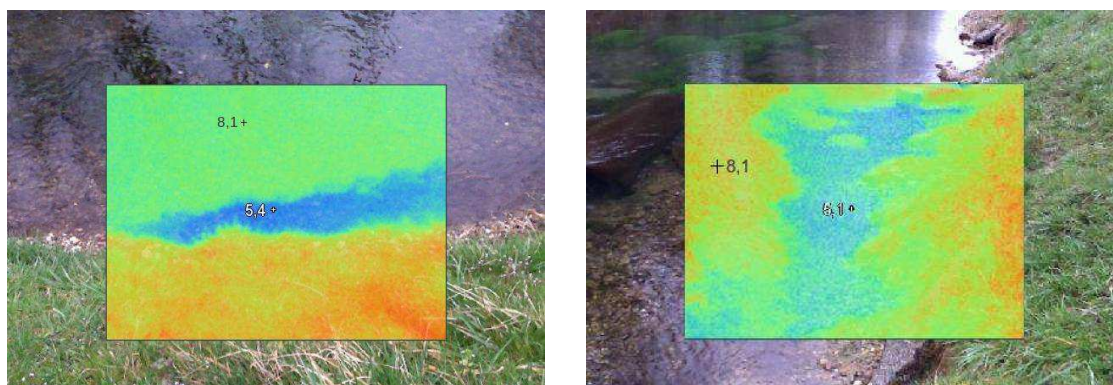


(b) Fuite localisée sur les cents premiers mètres amont du tronçon d'étude, présence majoritaire de matériaux grossiers.

FIGURE 6.2.9: Photos de fuites repérées par examen visuel

Lors de deux inspections visuelles, une caméra thermique infrarouge a été utilisée. Sensible au rayonnement émis par les matériaux, la caméra thermique permet d'accéder à la température de surface des corps. Cet outil s'est avéré efficace pour repérer des zones de température contrastées dans le contre-canal. L'arrivée des fuites dans le contre-canal provoque une variation locale de la température de celui-ci. Si cette variation est de plusieurs dixièmes de degré,

alors la caméra thermique peut mettre en évidence cette zone. Cependant, l'utilisation de cet outil est limité par les conditions météorologiques. Par grand soleil, les perturbations engendrées par les réflexions multiples du rayonnement solaire sont trop importantes pour accéder à des mesures exploitables. Par temps pluvieux, la méthode est également inexploitable. Les mesures réalisées en hiver par ciel couvert ont donné de bons résultats (Fig. 6.2.10). Sur l'image thermique présentée Fig. 6.2.10a, une zone de température plus faible ($5,4^{\circ}\text{C}$) que celle du contre-canal ($8,1^{\circ}\text{C}$) est mise en évidence, proche de la berge. Cette zone correspond à l'arrivée d'une fuite repérée à l'extrémité amont du tronçon d'étude. Par temps froid et nuageux, l'utilisation de la thermographie infrarouge a permis de compléter efficacement l'examen visuel. Là où la végétation gêne l'examen visuel, la caméra thermique peut améliorer la détection de fuites.



(a) Image thermique au niveau d'une fuite débouchant dans le contre-canal à l'extrémité amont du tronçon d'étude. Dans la zone de fuite la température en surface est de $5,4^{\circ}\text{C}$, dans le contre-canal elle est de $8,1^{\circ}\text{C}$.

(b) Image thermique au niveau d'une fuite débouchant dans le contre-canal à l'extrémité amont du tronçon d'étude. Dans la zone de fuite la température en surface est de $5,1^{\circ}\text{C}$, dans le contre-canal elle est de $8,1^{\circ}\text{C}$.

FIGURE 6.2.10

6.2.2.1 Conclusion

Dans le rapport d'auscultation, transmis par l'exploitant aux autorités publiques de tutelle en 2007, il est fait mention de fuites diffuses, visibles en pied de talus aval et sur tout le linéaire du tronçon d'étude. Ces fuites de faible débit ne font pas l'objet d'une surveillance spécifique. Les inspections visuelles que nous avons réalisées au cours de la campagne de mesures, ont permis de mettre en évidence ces zones de fuites diffuses dont la position et le nombre varient au cours du temps. Un suivi thermique régulier de l'une de ces fuites a montré un lien assez fort entre la température du GCA et celle de la fuite. Il témoigne d'un écoulement de vitesse non négligeable. La plupart des fuites repérées se situent dans les cents premiers mètres amont du tronçon d'étude. Sur toute cette zone, le sol en pied de digue est constitué de matériaux grossiers : il semblerait que le sol ait été lessivé.

Les observations des inspections visuelles apportent deux informations essentielles :

- nous savons avec certitude que les cents premiers mètres amont du tronçon d'étude comportent des fuites,
- la position des fuites et leur nombre varient au cours du temps.

Ces informations seront utiles pour l'analyse des données de température le long des fibres optiques.

6.2.3 Estimation de vitesse par traçage chimique

La section au PK178.630 comporte cinq piézomètres (Fig. 6.2.4). De plus, au pied de talus aval de cette section, des fuites ont été repérées lors de nos inspections visuelles. Cette section a donc été utilisée pour mettre en œuvre des techniques de traçage dont le but est d'obtenir une estimation de la vitesse des écoulements à la travers la digue. La mesure consiste à injecter, à l'intérieur de la digue, un colorant (Fig. 6.2.11) et à mesurer le temps de traversée jusqu'au contre-canal. Connaissant approximativement la distance parcourue par le traceur, une vitesse peut être calculée. Les détails de cette étude de traçage sont présentées dans l'annexe (B).



FIGURE 6.2.11: Dispositif d'injection de traceur

Des injections de traceurs⁴ ont été effectuées successivement dans trois piézomètres : P178.633G1, P178.633G2 et P178.633G3.

Pour les injections, dans P178.633G1 et P178.633G2 le traceur est apparu dans le contre-canal à la même position (Fig. 6.2.12a) : le chemin parcouru par l'écoulement dans la digue était identique pour les deux injections. En revanche, pour l'injection dans P178.633G3, situé plus en retrait du contre-canal que les deux autres piézomètres (Fig. 6.2.4), deux points de sortie du traceur dans le contre-canal (espacés de 12 m) ont été identifiés (Fig. 6.2.12b). Cette observation reflète la multiplicité des chemins d'écoulement à l'intérieur de la digue.

Pour chacune des injections, une estimation de la vitesse moyenne du colorant pour parcourir la distance séparant l'injection du contre-canal a été obtenue. Des résultats homogènes ont été obtenus. Ils ont permis d'évaluer la vitesse moyenne d'écoulement entre 5.10^{-4} m/s et 10^{-3} m/s (Tab. 6.1).

Avec cette estimation de la vitesse et celle du gradient hydraulique (§6.2.1.4), la perméabilité du milieu traversé peut être obtenue par application de la loi de Darcy. Avec un gradient compris entre 0,005 et 0,02, les vitesses mesurées correspondent à des perméabilités de l'ordre de 10^{-2} m/s à 10^{-1} m/s. La digue de Kembs étant réalisée en matériaux grossiers, cette estimation de perméabilité est cohérente.

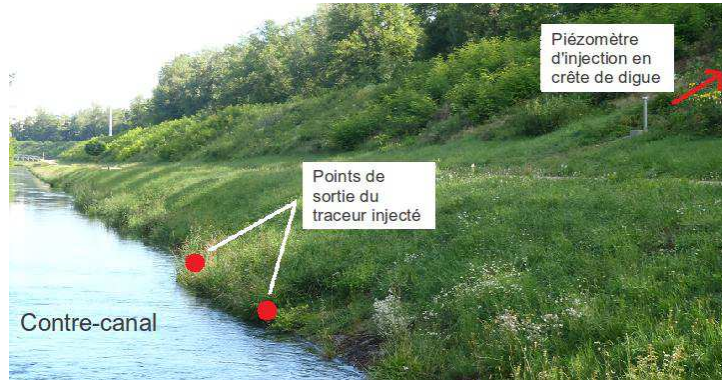
Piézomètre d'injection	P178.633G1 (essai 1)	P178.633G1 (essai 2)	P178.633G2	P178.633G3
Distance entre le point d'injection et le contre-canal (m)	10	10	20	38
Temps de parcours (min)	160	170	320	$900 < t < 1200$
Vitesse moyenne estimée (m/s)	$1,04.10^{-3}$	$0,98.10^{-3}$	$1,04.10^{-3}$	$5.10^{-4} < v < 7.10^{-4}$

TABLE 6.1: Mesures de temps de parcours et vitesses estimées

4. Le traceur qui a été utilisé est la Rhodamine WT : ce type de traceur est préconisé lorsque des mesures de concentration en colorant sont à effectuer.



(a) Apparition dans le contre-canal du traceur injecté dans un piézomètre



(b) Deux points de sortie (espacé d'environ 12 m) du traceur injecté dans le piézomètre P178.633G3

FIGURE 6.2.12

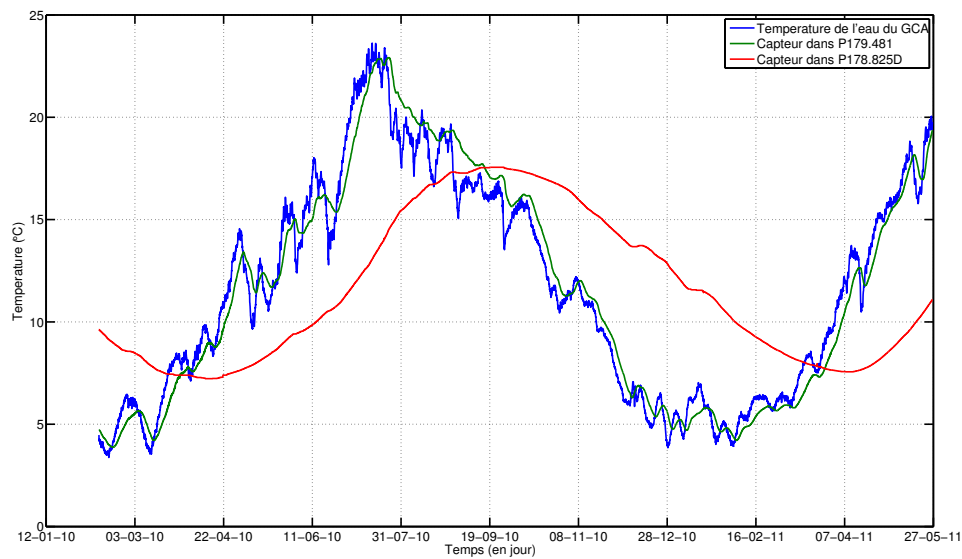
6.3 Contexte thermique

6.3.1 Température de l'ouvrage en profondeur

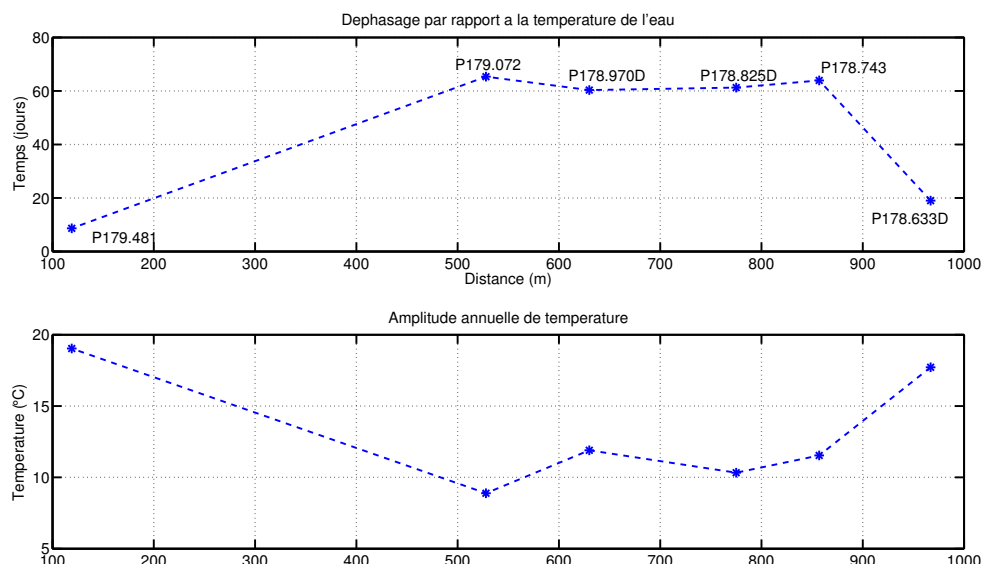
6.3.1.1 Aperçu des mesures sur le tronçon d'étude

Les piézomètres donnent accès à une mesure de la température de l'ouvrage en profondeur. Cette donnée a été mesurée dans onze piézomètres tout au long de la campagne de mesures. La plupart des piézomètres se situent au bord du canal. Nous comparerons les mesures issues de ces piézomètres.

Les mesures présentées ont été effectuées à une cote constante d'environ 234 m. Suivant les piézomètres, les comportements thermiques peuvent être très variables. Les mesures des piézomètres P179.481 et P178.825D affichent clairement cette variabilité (Fig. 6.3.1a). Pour l'un, P179.481, le signal de température est très proche de celui du GCA. En revanche, pour l'autre, P178.825D, le signal présente un déphasage de quasiment deux mois avec celui de l'eau. De plus, la forme du signal est quasiment sinusoïdale : il n'y a plus de variations hautes fréquences.



(a) Mesures de température du GCA et dans trois piézomètres de la digue à une même cote.



(b) Caractéristiques des mesures de températures obtenues dans les piézomètres situés en crête, proche du GCA (l'amplitude thermique du GCA est de 20°C)

FIGURE 6.3.1

Pour l'ensemble des piézomètres situés proche du GCA, les caractéristiques des signaux de température ont été comparées à celles du signal de température du GCA. L'amplitude annuelle de la température du GCA est d'environ 20°C. Deux piézomètres affichent une amplitude similaire : P179.481 ($\approx 19^\circ\text{C}$) et P178.633 ($\approx 18^\circ\text{C}$) (Fig. 6.3.1b). Pour les autres, les amplitudes sont plus faibles et comprises entre 8°C et 12°C. Quant au déphasage, évalué par rapport au signal de température du GCA, P179.481 et P178.633 présentent également des valeurs éloignées de celles des autres piézomètres. Pour ces deux piézomètres, le déphasage

est inférieur à 20 jours alors que pour les autres, il dépasse 60 jours.

Globalement ces mesures de température dans les piézomètres situés proche du GCA, mettent en évidence deux groupes. Le premier est constitué par les piézomètres P178.633 et P179.481. L'un et l'autre ont un comportement thermique similaire à celui du GCA : les amplitudes et les phases sont proches. Le deuxième groupe, rassemblant les piézomètres situés entre 530 m et 860 m, présente un comportement thermique plus éloigné de celui du GCA : les amplitudes sont plus faibles et le déphasage important, plus de deux mois. Ces observations montre qu'un écoulement de vitesse plus élevée traverse les piézomètres du premier groupe. D'après les estimations de déphasage, on peut estimer que les vitesses d'écoulement sont au moins trois fois plus grandes dans le premier groupe que dans le second.

Les chaînes de capteurs placées dans les piézomètres comportent plusieurs sondes espacées verticalement (Fig. 6.1.6). Le but de cet arrangement était d'obtenir des profils verticaux de température, offrant la possibilité de localiser la position et la taille de la zone d'écoulement. Cependant, la faible hauteur d'eau présente dans les piézomètres du tronçon d'étude (en moyenne 2 m à 3 m) n'a pas permis d'obtenir ce type de profil vertical de températures : pour chaque piézomètre, seuls 1 à 3 capteurs étaient immergés.

6.3.1.2 Estimation de vitesse dans la section au PK178.633

Dans les piézomètres, l'influence de la température de l'air sur celle mesurée par les capteurs immergés est négligeable. La méthode de Johansson et Hellström (2001), aussi appelée méthode des amplitudes (§2.2.3.2), est alors applicable. Les résultats de cette méthode peuvent être comparés à ceux obtenus par MORITO. Pour l'application de la méthode de Johansson et Hellström (2001), le logiciel commercial DamTemp (version de 2001), créé par Johansson et Hellström (2001), a été utilisé.

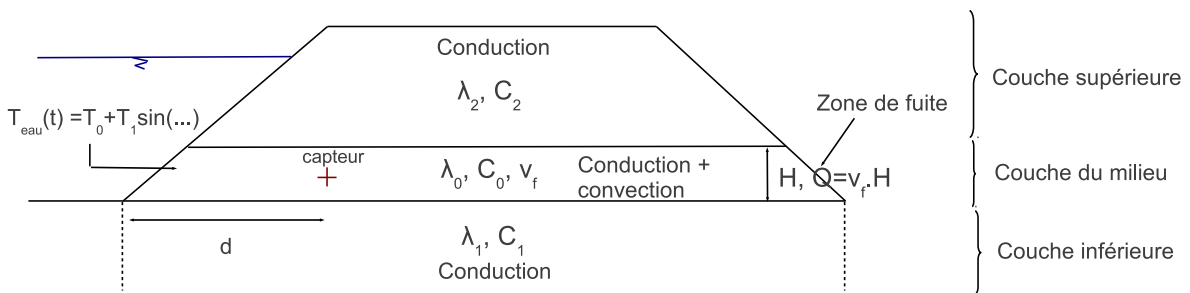


FIGURE 6.3.2: Schéma explicatif du modèle de Johansson et Hellström (2001) appliqué à la section en travers au PK 178.633

Application de la méthode de Johansson et Hellström (2001) Nous allons rappeler quelques éléments de la méthode de Johansson et Hellström (2001). Cette dernière suppose que la zone de fuites à travers l'ouvrage est concentrée dans un conduit de hauteur H (Fig.

6.3.2). La propagation de la tendance saisonnière de la température du réservoir (ici le GCA) à travers l'ouvrage est étudiée à l'aide d'un modèle thermique tri-couche. Les trois couches sont définies sur le schéma (Fig. 6.3.2) Dans la couche supérieure et inférieure, on suppose que les échanges thermiques se font uniquement par conduction : les coefficients de capacité calorifique volumique (C_1 et C_2) et de conductivité thermique (λ_1 et λ_2) du sol sont à renseigner. Nous avons choisi des valeurs caractéristiques d'un sol constitué de gravier pour ces paramètres⁵. La couche du milieu concentre l'écoulement : les échanges thermiques se font par conduction et advection. Cette couche est supposée constituée de gravier de plus faible perméabilité que les couches supérieures et inférieures. Cependant, cette légère différence de perméabilité affecte très faiblement les paramètres thermiques du milieu. Ainsi, des valeurs identiques à λ_1 et C_1 ont été choisies pour λ_0 et C_0 .

L'épaisseur H de la zone de fuite doit également être renseignée. Pour cette donnée, difficile à estimer, nous avons choisi de considérer la charge hydraulique moyenne, mesurée dans la section en travers au PK178.633 par rapport au plafond du GCA : $H \approx 2,50$ m (Fig. 6.2.4). Les données de température à renseigner ne concernent que la température de l'eau du réservoir i.e. celle du GCA dans notre cas. Soulignons que pour appliquer ce modèle, il est nécessaire de disposer de données de température de l'eau sur une période supérieure ou égale à un an. En effet, le modèle ne prend en compte que la tendance saisonnière de la température de l'eau du réservoir définie par sa valeur moyenne, son amplitude et la date de son maximum. Dans DamTemp, la saisie de la date du maximum est contrainte : pour un mois donné, seuls trois choix sont possibles (le 1er, le 10ème ou le 20ème jour de ce mois) pour renseigner la date du maximum de température. Cette rigidité complique l'utilisation du modèle.

Une dernière donnée à renseigner est la distance « d » séparant le réservoir du capteur enfoui dans l'ouvrage (Fig. 6.3.2).

Une fois les données d'entrée renseignées, l'estimation du débit de fuite, dans la couche du milieu, à l'aide de DamTemp se fait par tâtonnement : l'utilisateur saisit une valeur de débit « Q » et le logiciel génère une sinusoïde représentant la tendance saisonnière de la température au capteur dont la position a été préalablement définie. La valeur de débit renseignée par l'utilisateur est correcte, si la sinusoïde générée est visuellement semblable à la tendance saisonnière mesurée au capteur : il n'existe aucun critère mathématique de calage.

5. Nous avons considéré le sol comme étant saturé dans la couche inférieure et sec dans la couche supérieure. Les valeurs choisies des paramètres thermiques tiennent compte de cette variation du degré de saturation.

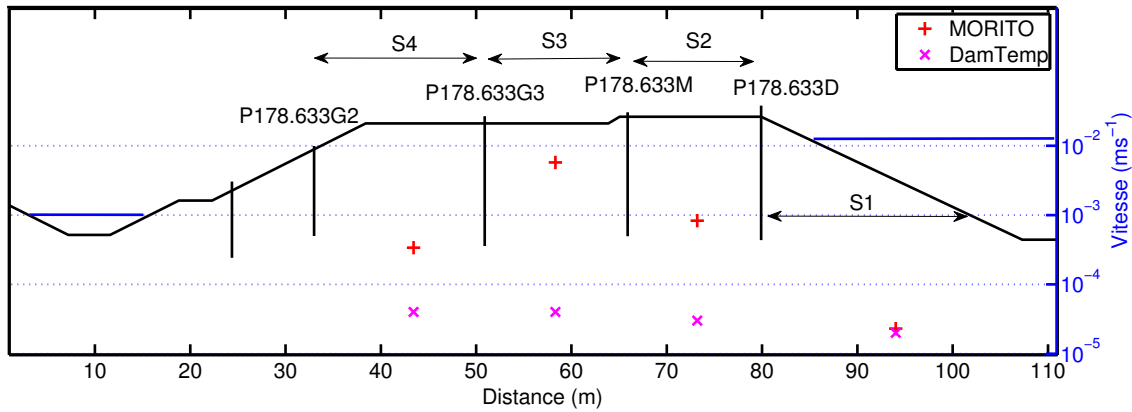


FIGURE 6.3.3: Vitesses d'écoulement moyenne pour les sections S1 à S4 estimée à partir des mesures de température en utilisant MORITO et DamTemp, le logiciel exploitant le modèle de Johansson et Hellström (2001).

La section en travers au PK178.633 dispose de quatre piézomètres instrumentés en capteurs de température (Fig. 6.2.4). Pour obtenir une estimation de la vitesse moyenne des écoulements pour chaque section S1 à S4 (Fig. 6.3.3), la température de l'eau du réservoir, donnée d'entrée de DamTemp, a été remplacée par celle des différents piézomètres. Donnons un exemple : pour estimer la vitesse moyenne entre P178.633D et P178.633M, les données de température de P178.633D ont été utilisées comme données d'entrée dans DamTemp, à la place de la température du réservoir. Cette manière de procéder permet d'obtenir une distribution de la vitesse moyenne dans la section en travers au PK178.633D.

Pour déterminer une valeur de vitesse pour chaque section S1 à S4, nous avons essayé de caler la tendance saisonnière fournie par DamTemp sur celle obtenue à partir des capteurs dans les piézomètres (Fig. 6.3.4). Précisons que DamTemp ne fournit aucun outil pour réaliser ce calage qui reste entièrement visuel. Les valeurs de vitesses d'écoulement estimées sont homogènes et de l'ordre de 10^{-5} m/s. Étant donné la méthode visuelle de calage, les estimations de vitesse sont approximatives : elles ont une marge d'erreur autour de $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

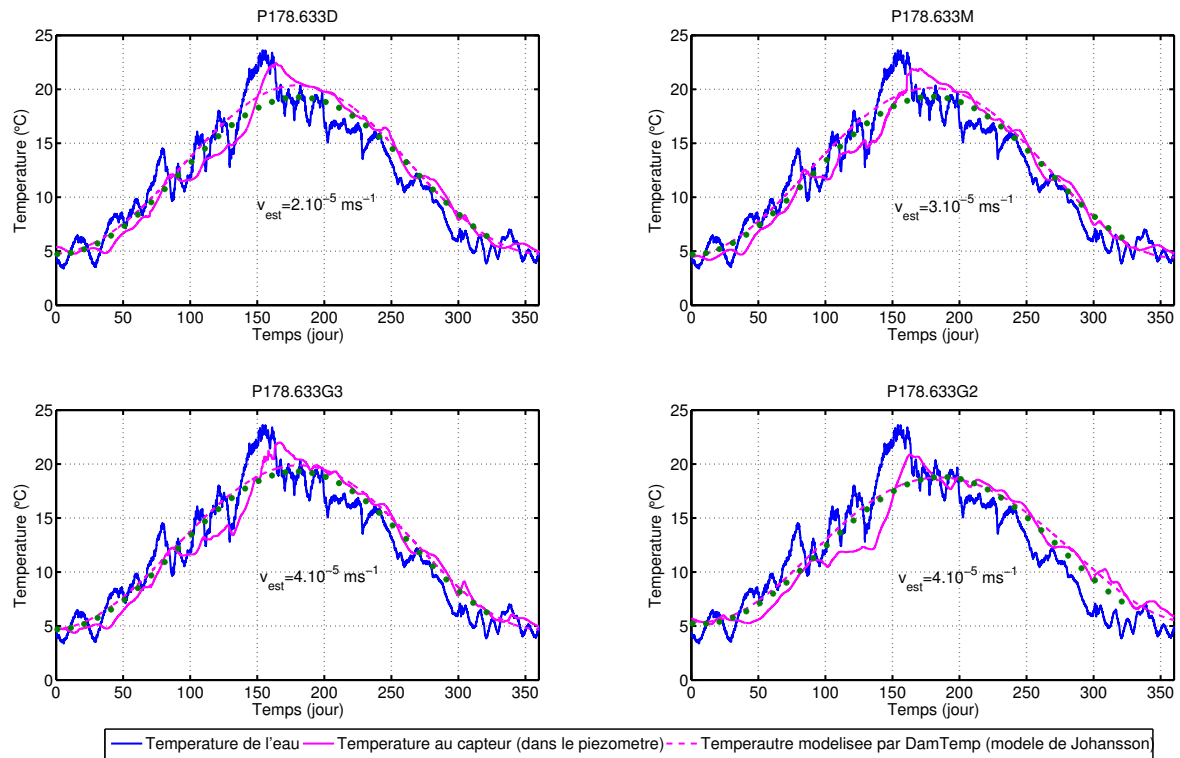


FIGURE 6.3.4: Modélisation de la température dans les piézomètres de la section en travers au PK178.633 à l'aide de DamTemp, logiciel exploitant le modèle de Johansson. La vitesse d'écoulement estimée par le modèle v_{est} est indiqué sur chaque graphique. (Johansson et Hellström, 2001).

Application de MORITO Une analyse similaire à la précédente a été menée avec MORITO (Fig. 6.3.5). Le modèle a été appliqué pour chaque section S1 à S4. Les vitesses estimées sont globalement comprises entre 10^{-4} m/s et $5 \cdot 10^{-3}$ m/s : seule celle estimée pour S1 est plus faible : $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Comme pour DamTemp, les écoulements à travers la digue sont supposés transversaux.

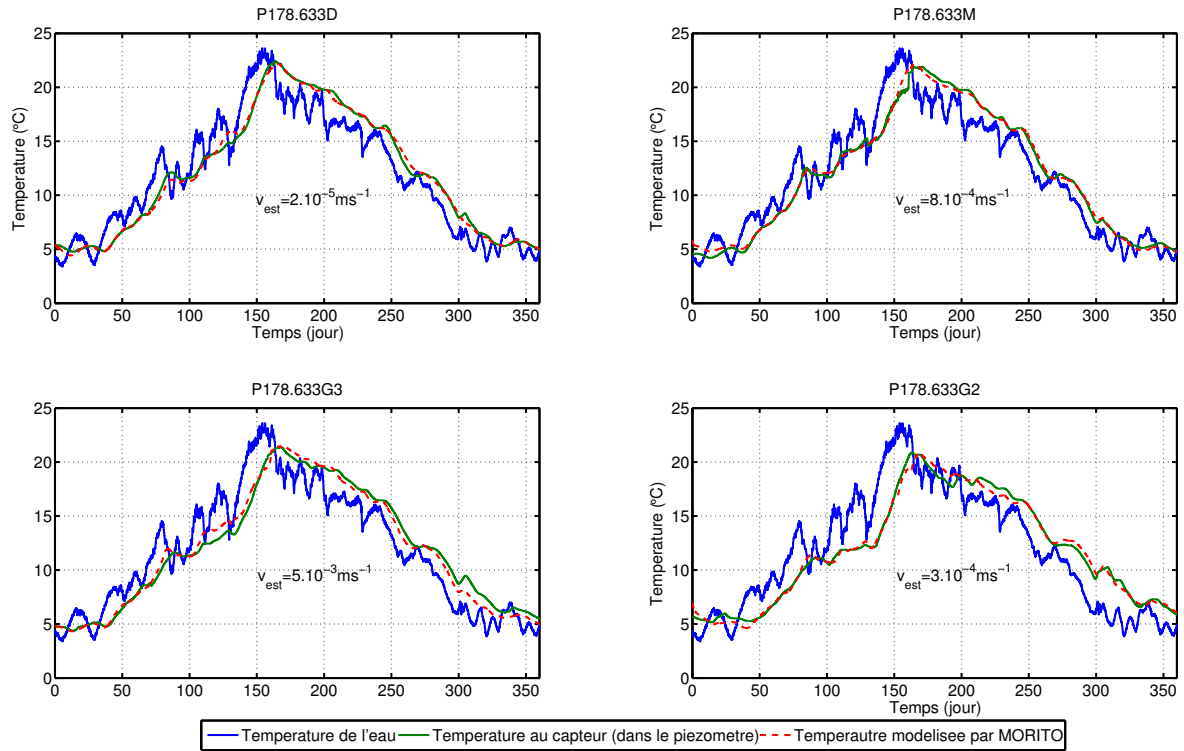


FIGURE 6.3.5: Modélisation de la température dans les piézomètres de la section en travers au PK178.633 à l'aide de MORITO. La vitesse d'écoulement estimée par le modèle v_{est} est indiquée sur chaque graphique. (Johansson et Hellström, 2001).

Comparaison de DamTemp et MORITO À partir des mesures de température effectuées dans les piézomètres de la section en travers au PK178.633, la vitesse moyenne des écoulements traversant cette section a pu être estimée à l'aide de DamTemp, exploitant le modèle de Johansson et Hellström (2001), et MORITO. Les estimations réalisées reposent sur l'hypothèse d'écoulements transversaux.

Pour la section S1, entre le réservoir et le piézomètre P178.633D, DamTemp et MORITO évaluent des vitesses moyennes d'écoulement quasi-identiques de l'ordre de 2.10^{-5} m/s (Fig. 6.3.3).

Pour les autres sections, S2 à S4, les vitesses d'écoulement estimées par DamTemp sont analogues aux précédentes, i.e. 10^{-5} m/s, tandis que MORITO conduit à des valeurs comprises entre 10^{-4} m/s et 5.10^{-3} m/s, nettement supérieures aux autres valeurs obtenues.

Les estimations de MORITO concordent avec les mesures ponctuelles de vitesse d'écoulement obtenues par traçage : la vitesse moyenne d'écoulement entre P178.633G3 et le contre-canal a été mesurée entre 5.10^{-4} m/s et 10^{-3} m/s (Tab. B.1). La faible vitesse estimée par MORITO pour S1 est probablement liée au fait que l'écoulement n'arrive pas du réservoir transversalement comme supposé mais en biais. La distance prise pour les calculs de la vitesse est alors sous estimée.

Quant à DamTemp, ses estimations sous-estiment d'une puissance de dix les vitesses d'écoulement. Le modèle ne semble pas adapté pour modéliser les transferts thermo-hydrauliques au sein d'une digue où les contrastes de perméabilité sont faibles comme c'est le cas de la digue de Kembs constituée essentiellement de gravier.

6.3.2 Température sous le talus aval : mesures par fibre optique

6.3.2.1 Fibre optique piste

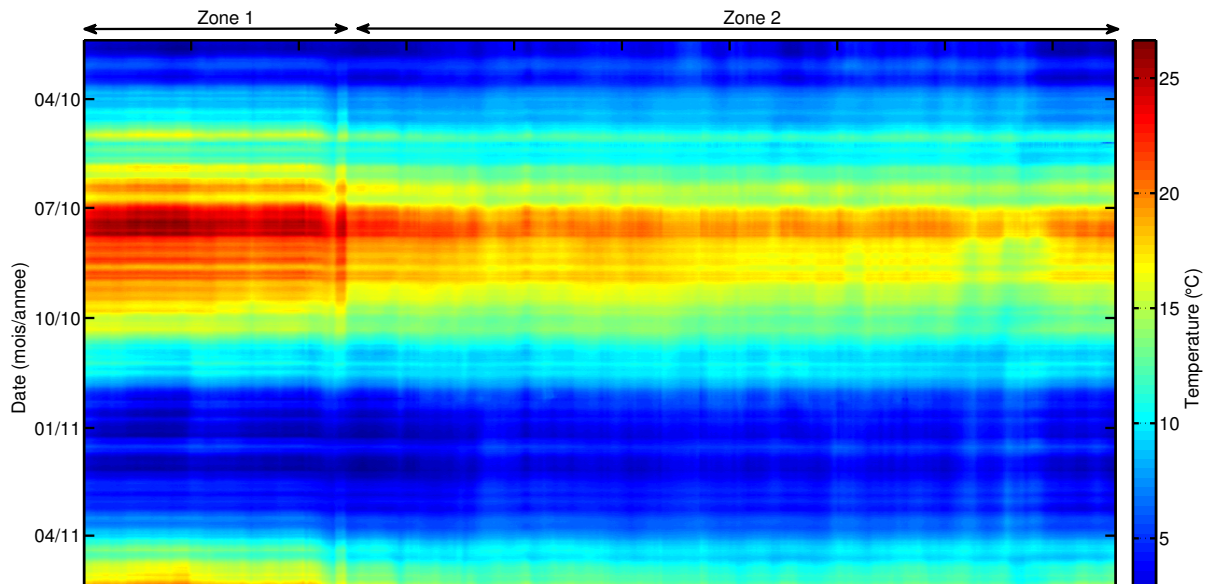
Pour donner un aperçu des mesures de l'ensemble des capteurs sur toute la période de la campagne d'essais, les données sont représentées sous forme d'image : un code couleur est utilisé pour représenter les variations de la température en fonction de la distance et du temps. Pour la fibre piste comme pour la fibre contre-canal, l'alternance des saisons est clairement visible : les variations des couleurs chaudes (températures élevées) aux couleurs froides (températures basses) marquent la transition de l'été à l'hiver (Fig. 6.3.6a ou Fig. 6.3.7a). Pour la fibre optique piste, deux zones se démarquent. Elles sont plus nettement visibles durant la période estivale. La zone 1, de 0 m à environ 220 m, apparaît plus contrastée que la zone 2, occupant le reste du linéaire. Ce contraste met en évidence des amplitudes de température annuelle plus élevées en zone 1 qu'en zone 2. Le tracé des mesures de température d'un capteur en zone 1 et d'un autre en zone 2 marque nettement cette différence d'amplitude (Fig. 6.3.6b) : pour le capteur en zone 1, l'amplitude annuelle atteint quasiment 25°C , alors que pour celui en zone 2, elle avoisine les 17°C , soit une différence d'amplitude annuelle de 8°C .

En fait, cette différence résulte très probablement du terrain de couverture de la piste. Une zone d'environ 800 m de la section d'étude intersecte une piste cyclable réalisée en graviers compactés. Cette sur-couche de terrain stabilisé isole vraisemblablement la fibre optique des influences de la température de l'air.

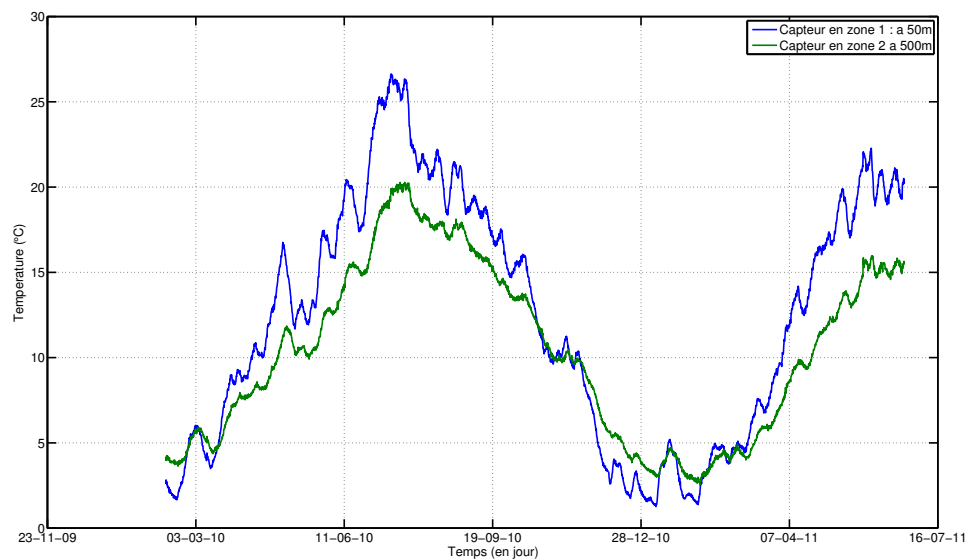
6.3.2.2 Fibre optique contre-canal

Contrairement aux données de la fibre piste, celles de la fibre contre-canal apparaissent beaucoup plus homogènes dans la direction spatiale (Fig. 6.3.7a). Rappelons que la fibre contre-canal est située à 10 cm sous le contre-canal, recouvert de gros graviers. La température de l'eau du contre-canal a donc une influence prépondérante sur celle de la fibre. Néanmoins, à l'extrémité amont de la section d'étude, sur les cents cinquante derniers mètres, une zone discontinue de rupture de l'homogénéité spatiale des couleurs est visible. Ces zones, où les mesures de température divergent de celles des autres capteurs, seront appelées zones d'anomalies thermiques.

La température d'un capteur en zone d'anomalie a été comparée à celle d'un capteur hors zone d'anomalie (Fig. 6.3.7b). La tendance saisonnière est déphasée de plus de 60 jours par rapport à une mesure « normale ». L'évolution de la température présente des phases de

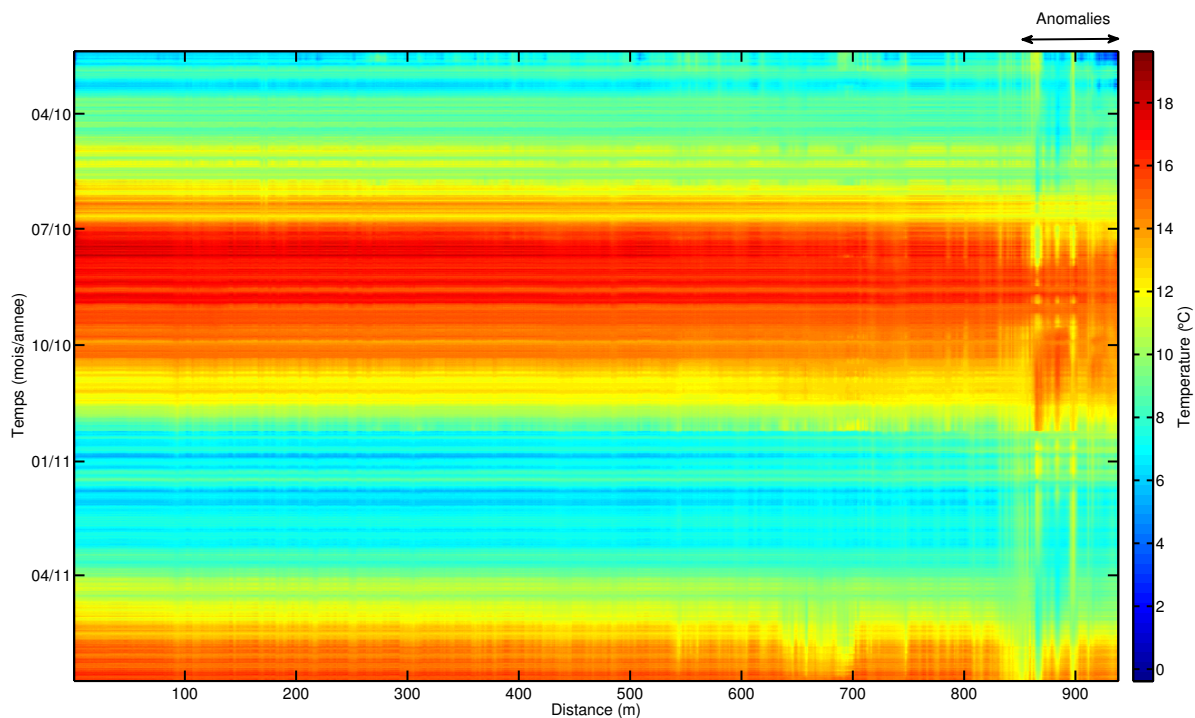


(a) Image des mesures de température de la fibre piste sur l'ensemble de la campagne de mesures.

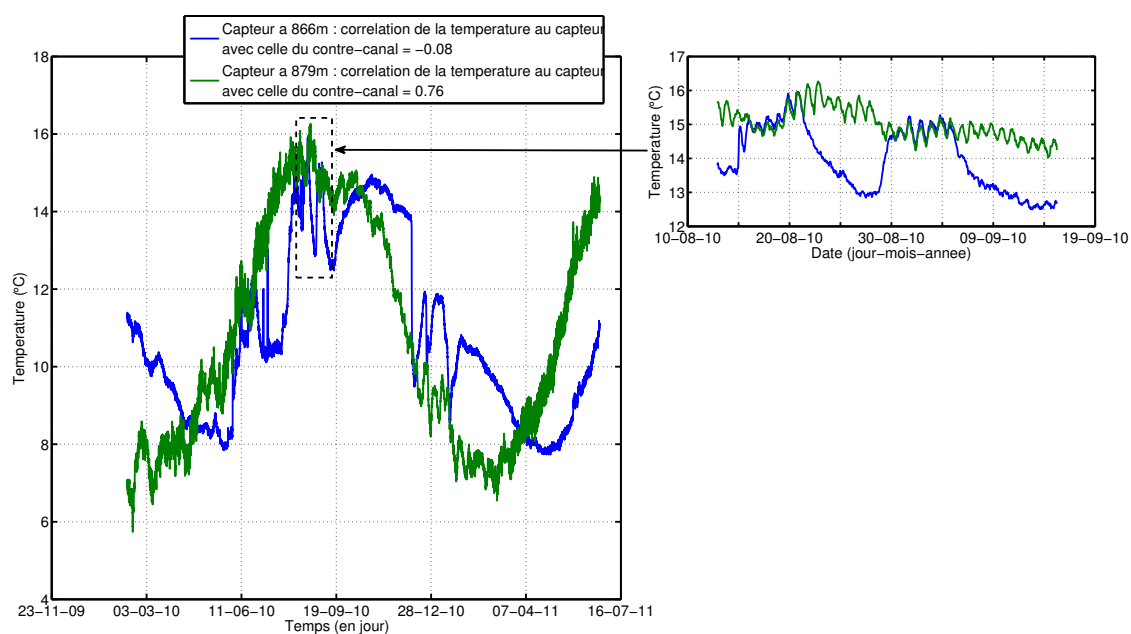


(b) Mesures de température d'un capteur situé en zone 1 (amplitude annuelle élevée) et d'un autre situé en zone 2 (amplitude annuelle plus faible)

FIGURE 6.3.6: Aperçu des mesures de température de la fibre piste



(a) Image des mesures de température de la fibre contre-canal sur l'ensemble de la campagne de mesures.



(b) Mesures de température pour un capteur situé dans une zone d'anomalie de corrélation avec la température du contre-canal et pour un capteur en-dehors de cette zone

FIGURE 6.3.7

rupture de quelques heures au bout desquelles la température devient similaire à celle d'un capteur hors zone d'anomalie (zoom Fig. 6.3.7b) ou s'en éloigne de plusieurs degrés. Une autre source d'influence thermique régit, à certains moments, la température des points en zone d'anomalie. D'après le comportement de rupture constaté sur le signal de température, il semblerait que ces sources d'influence ne soient pas permanentes. Elles fluctuent au fil du temps.

La cote de la nappe phréatique rhénane fluctue également dans le temps, en fonction des apports hydrologiques. Les variations annuelles mesurées à proximité du site sont de l'ordre de 1 m (Fig. 6.3.8). Or dans le contre-canal, la nappe est affleurante et peut avoir une influence thermique sur la fibre contre-canal. Cette influence fluctue suivant le niveau de la nappe, ce qui expliquerait les ruptures constatées sur le signal de température.

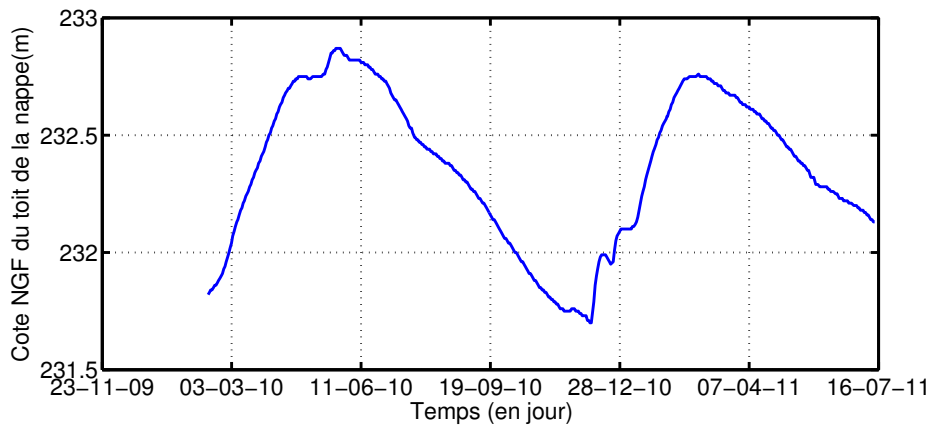


FIGURE 6.3.8: Variation de la cote du toit de la nappe phréatique rhénane mesurée à l'aval de l'usine hydroélectrique de Kembs sur la durée de la campagne de mesures. (Données publiques de l'APRONA (Association pour la PROtection de la Nappe phréatique de la plaine d'Alsace))

6.4 Résultats Piste

6.4.1 Application de AJOUT

6.4.1.1 Deux zones spatiales à distinguer

Le modèle AJOUT a été appliqué sur l'ensemble des capteurs de la fibre piste. Le paramètre de détection d_p a été calculé pour chaque jour de mesures et pour chaque capteur. De manière à obtenir une vision globale des valeurs du paramètre de détection d_p pour chaque capteur sur l'ensemble de la période de mesure, la moyenne temporelle de ce dernier, notée \bar{d}_p , est étudiée dans un premier temps (Fig. 6.4.1a). Sur les deux cents premiers mètres de la fibre piste, les valeurs de \bar{d}_p varient globalement entre 0,065°C et 0,09°C. Sur

la suite du linéaire, \bar{d}_p présente une variabilité moindre, mais sa valeur augmente constamment, de manière quasi-linéaire. Seuls les derniers mètres contrastent avec cette tendance : une augmentation soudaine est constatée sur les quinze derniers mètres. Ainsi, deux zones de comportement différent peuvent être identifiées : la première s'étend de 0 m à 220 m (zone 1) et la dernière (zone 2) couvre le reste du linéaire.

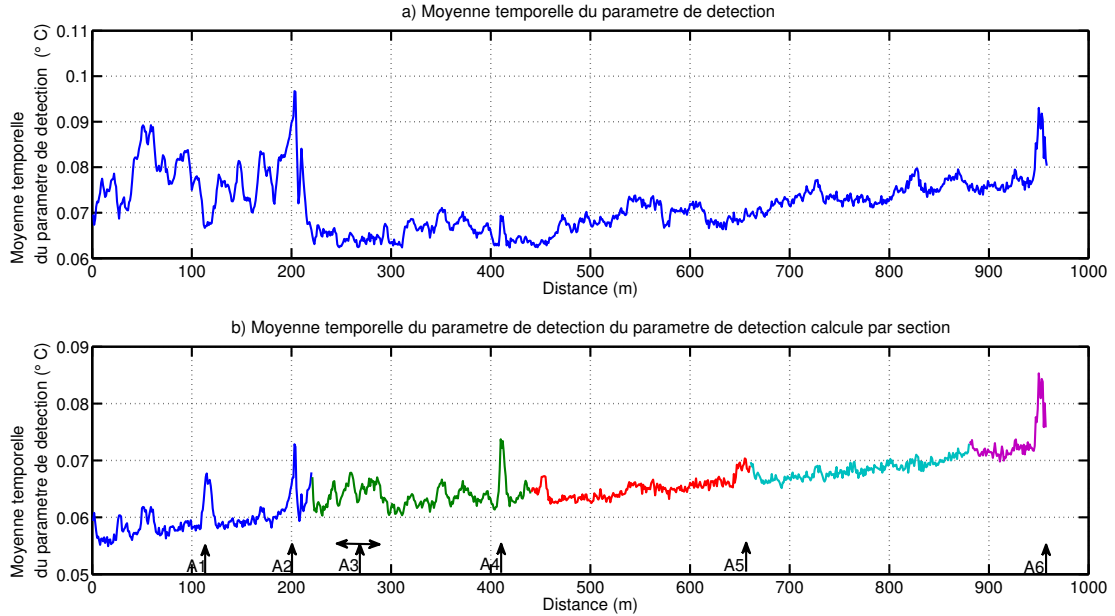


FIGURE 6.4.1: Moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p calculée pour chaque capteur de la fibre piste, mise en évidence de deux zones distinctes et d'anomalies dont certaines sont pointées par des flèches.

- a) \bar{d}_p calculé pour chaque capteur de la fibre piste en appliquant AJOUT sur l'ensemble des capteurs.
- b) \bar{d}_p pour chaque capteur de la fibre piste en appliquant ajout sur des zones de 220m

Rappelons que le modèle AJOUT se base sur l'ensemble de la matrice de données pour déterminer pour chaque capteur un profil de température de référence. En théorie, ce profil représente le comportement thermique en l'absence de fuite puisque l'hypothèse est faite que la grande majorité des capteurs ne sont pas traversés par une fuite. Ici, cette hypothèse n'est vraisemblablement pas respectée. Plus d'un cinquième des capteurs présentent un comportement divergent. Pour respecter les hypothèses du modèle, AJOUT a été appliqué sur des tronçons de 220 m, excepté la dernière, d'environ 70 m (Fig. 6.4.1b). Notons qu'un découpage en tronçons plus courts (de 50 m) a été testé : les résultats sont quasi-identiques au découpage en tronçons de 220 m.

Sur la zone de 0 m à 220 m, les valeurs de la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p sont beaucoup moins dispersées que dans l'analyse précédente. Cette observation confirme

l'existence, sur la fibre piste, de deux zones de comportement thermique différent, déjà mises en évidence par l'analyse des données brutes et justifiées par la présence partielle d'un revêtement spécifique pour une piste cyclable (§6.3.2.1).

Sur toutes les zones, \bar{d}_p présente des hausses singulières. Un certain nombre de ces zones, celles de plus forte amplitude, ont été choisies et référencées de A1 à A6. Nous reviendrons par la suite sur ces anomalies.

6.4.1.2 Effets liés au système de mesure

Sur l'ensemble des tronçons, la tendance d'évolution de la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p est quasi-linéaire. Cette évolution semble corrélée à la distance d'éloignement des capteurs à la source, i.e. l'appareil optoélectronique. Pour vérifier cette hypothèse, AJOUT a été appliqué aux données « retour » de la fibre piste. Comme nous l'avons vu précédemment (§6.1.3.1), l'installation optique donne accès à deux mesures de profil pour chaque câble : un profil « aller » et un profil « retour ». \bar{d}_p a été tracée pour les mesures « aller » et « retour » (Fig. 6.4.2).

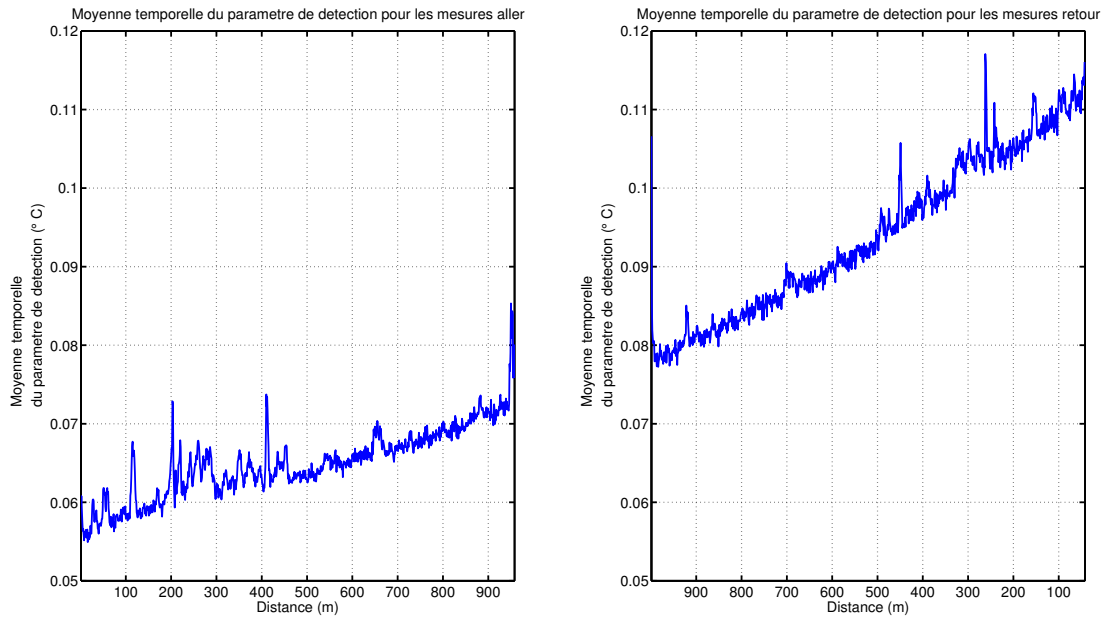


FIGURE 6.4.2: Moyenne temporelle du paramètre de détection, \bar{d}_p , calculée pour chaque capteur de la fibre optique aller (gauche) et retour (droit). Mise en évidence d'une tendance linéaire à relier aux pertes linéaires de signal optique.

Pour l'aller comme pour le retour, \bar{d}_p augmente de manière quasi-linéaire avec la distance. Notons toutefois une rupture de continuité entre l'aller et le retour. La corrélation entre la tendance d'évolution de \bar{d}_p et l'éloignement à l'appareil optoélectronique est confirmée. La tendance linéaire constatée est très certainement liée à la mesure. Les mesures de température

par fibre optique sont basées sur l'analyse spectrale de signaux lumineux propagés dans la fibre optique. Pour chaque acquisition de température, un pulse lumineux est envoyé dans la fibre optique. En se propageant le long de la fibre, le pulse subit des pertes d'intensité. Certaines sont ponctuelles et peuvent résulter d'une soudure, d'un connecteur optique ou d'une contrainte mécanique sur la fibre). D'autres sont linéaires et liés à divers phénomènes de diffusion. La tendance linéaire constatée pourrait être liée à ces pertes. Quant à la rupture de continuité, elle résulte très certainement des pertes dues à la soudure entre la fibre aller et retour. Ces problèmes de mesure peuvent être constatés sur les signaux brutes de température (Fig. 6.4.3). Le profil de température « aller » ne se superpose pas au profil de température « retour ». Il y a non seulement un décalage fixe de température (d'environ 0,54°C, Fig. 6.4.3a) mais aussi un écart croissant avec la distance parcourue (Fig. 6.4.3b). Le décalage peut s'expliquer par la dérive linéaire due aux pertes optiques linéaires et par la soudure entre les deux fibres optiques. Dans la suite de l'étude, la tendance linéaire liée aux pertes optiques linéaires a été retirée pour faciliter l'analyse.

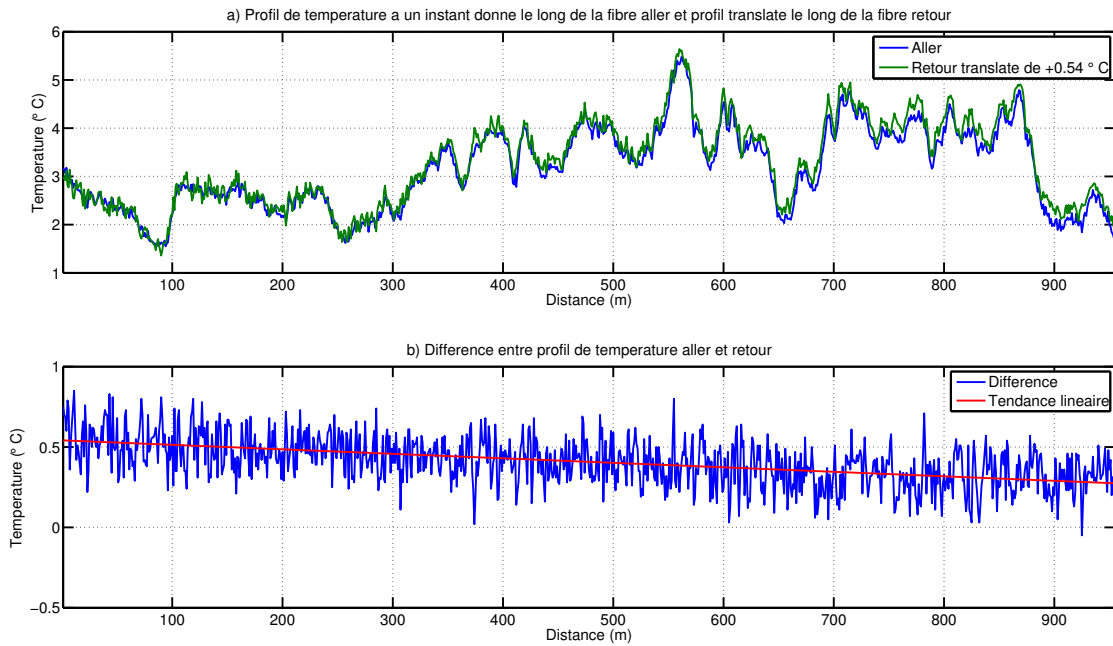


FIGURE 6.4.3: a) Profil de température mesuré à un instant donné le long de la fibre aller et profil retour translaté de 0,54°C

b) Différence de températures entre le profil aller et retour mesuré à un instant donné, mise en évidence d'une tendance linéaire pour la différence.

6.4.1.3 Analyse des anomalies repérées

Six zones d'anomalies de la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p ont été référencées (Fig. 6.4.1). Pour avoir un aperçu de l'évolution temporelle du paramètre de

détection d_p dans ces zones et en dehors, les valeurs de d_p obtenues pour chaque capteur et chaque jour de mesure ont été représentés sous forme d'image (Fig. 6.4.4). Sur cette image apparaissent des raies verticales de couleurs contrastées. Elles correspondent à une hausse ou baisse de d_p sur l'ensemble des capteurs. Ces variations ne sont pas liées à des perturbations thermiques telles que des fuites. Les raies horizontales ne concernent que certains capteurs et la plupart correspondent aux zones d'anomalies mises en évidence précédemment : les zones A1 à A5. Ces raies horizontales sont visibles sur l'ensemble de la période de mesures : la raie traverse l'image. Cette observation indique que la température mesurée par ces capteurs est en tout temps contrastée par rapport à celle des autres capteurs. Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées :

- les propriétés thermiques des matériaux environnant le capteur sont localement différentes. Une hétérogénéité locale des matériaux de la digue peut être à l'origine de ces différences
- les sollicitations thermiques peuvent être différentes : un écoulement peut traverser le capteur.

Enfin, outre les raies verticales et horizontales, un événement singulier est mis en évidence sur l'image du paramètre de détection d_p : un trait rouge effilé puis épais entre 860 m et 960 m. Dans sa partie effilée, l'événement ne concerne qu'un seul jour de mesure, au mois de mai 2010. Dans sa partie épaisse, il s'étale sur plusieurs jours. Cet événement correspond spatialement à l'anomalie A6. Il affecte notablement les capteurs situés de 870 m à 960 m, mais un effet peut être repéré sur tous les autres capteurs à cette même période : une légère raie allant entre 0 m et 870 m et s'étalant sur quelques jours est visible. Cette observation tend à supposer un problème de mesure. Cependant, l'intensité localement élevée de l'événement reste inexpliqué.

Finalement, à partir de l'image des valeurs spatiales et temporelles de d_p , les anomalies A1 à A6 ont pu être précisées. Les anomalies A1 à A5 correspondent à des zones de température contrastées par rapport aux autres capteurs. Ce contraste est perceptible sur l'ensemble de la période de mesures. L'anomalie A6 correspond à un événement localisé dans le temps et dans l'espace. Cependant, à la même période, on constate une légère perturbation sur l'ensemble des capteurs qui laisse supposer un problème de mesures.

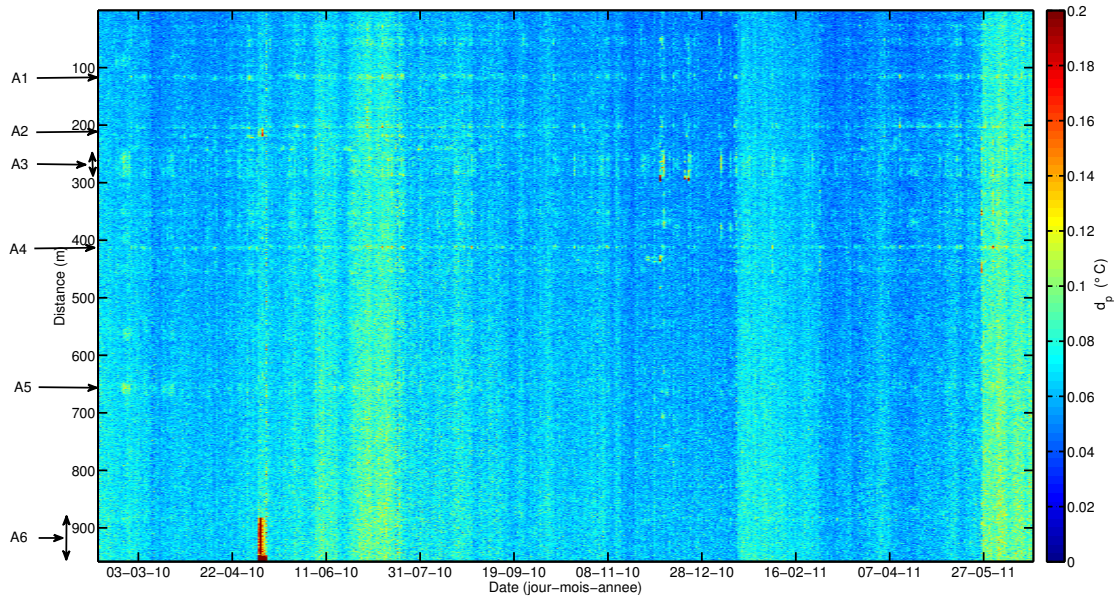


FIGURE 6.4.4: Image des valeurs du paramètre de détection d_p calculé en chaque capteur, signalement de zones d'anomalies (A1 à A6)

Pour poursuivre l'analyse des zones d'anomalies, la moyenne temporelle du paramètre de détection, \bar{d}_p , qui renseigne sur la position des différentes zones, a été comparée à l'amplitude annuelle de température ainsi qu'au déphasage avec la température de l'air et de l'eau, le long de fibre piste (Fig. 6.4.5). Les déphasages ont été calculés à partir des tendances saisonnières des signaux de température. Cette méthode aboutit à un déphasage de 6 jours entre la température de l'air et celle de l'eau. Aux points d'anomalies A3, A4 et A5, l'amplitude annuelle de température augmente localement. En ces points, la sollicitation thermique majoritaire (la température de l'air ou de l'eau) est moins amortie. De plus, pour les anomalies A4 et A5, le déphasage (avec l'air ou l'eau) diminue. Curieusement, pour A3, aucune variation notable du déphasage n'est observée. Enfin, pour les autres zones d'anomalies, A1, A2 et A6, la confrontation de ces données (amplitudes annuelles et déphasage) n'apporte aucune information.

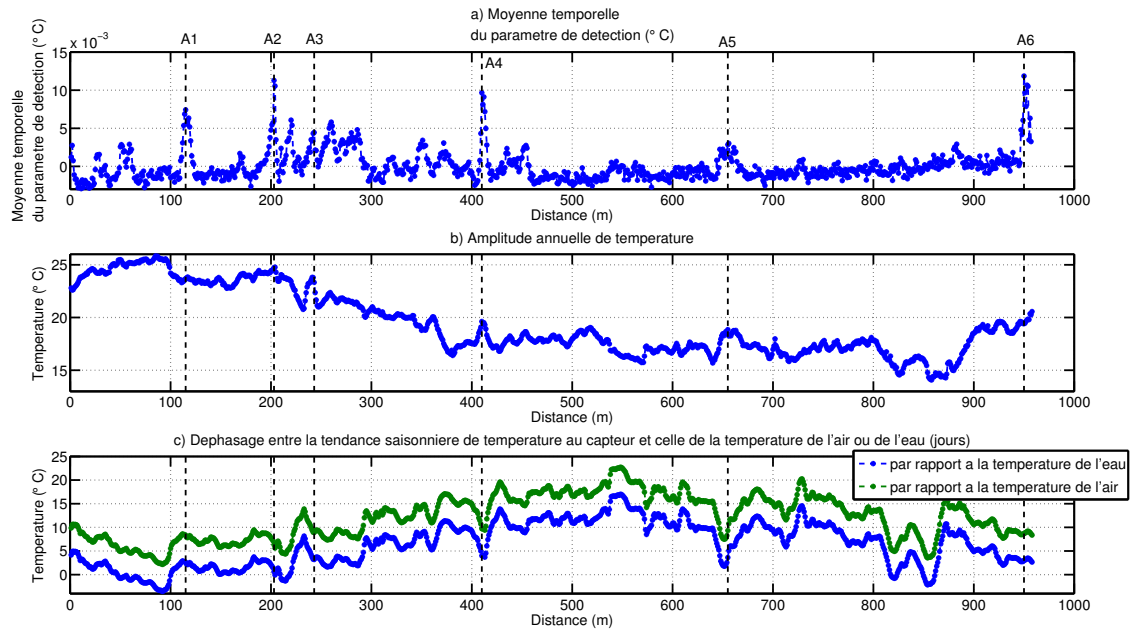


FIGURE 6.4.5: Analyse comparée de :

- a) la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p
- b) l'amplitude annuelle de température mesurée aux capteurs de la fibre piste
- c) le déphasage entre la tendance saisonnière de la température mesurée au niveau de la fibre et celle de la température de l'air ou de l'eau

L'inter-comparaison permet d'expliquer certaines anomalies (A3, A4 et A5).

Pour expliquer l'anomalie A6, les mesures de température d'un capteur dans la zone d'anomalie (950 m) ont été comparées avec celles d'un capteur en bordure de la zone (940 m), pour la période concernée, début mai 2010 (Fig. 6.4.6). Pour les deux capteurs, un décrochement est visible le 6 mai dans l'après-midi. Ce décrochement provient d'un problème de mesures inexpliqué entre le 6 mai et le 12 mai. Entre ces deux dates, le signal de température sur l'ensemble des capteurs a été comme translaté de quelques degrés vers le bas. Pour corriger ce problème, le morceau de signal a été translaté vers le haut. La valeur de translation prise est spécifique à chaque capteur : elle est égale au saut de température constaté le 12 mai. La correction est parfaite le 12 mai pour l'ensemble des capteurs. En revanche, pour le 6 mai, un décalage de quelques dixièmes de degré peut subsister. Il est d'ailleurs visible pour les deux capteurs étudiés. Pour le capteur situé à 950 m, dans la zone d'anomalie, on observe entre le 6 mai et 12 mai des variations d'amplitude journalière comprises entre 0,5°C et 1°C. Ces variations sont plutôt inattendues car, tout au long de la piste et sur l'ensemble de la période de mesure, les variations journalières ne sont pas perceptibles. La fibre optique est enterrée trop profondément (1m) pour être sensible aux variations journalières. Les oscillations constatées sur le capteur dans la zone d'anomalie sont légèrement déphasées avec celles de la température de l'air. Quant à la température de l'eau du GCA, les variations

d'amplitude journalière de température sont à peine perceptibles. Ces observations portent à croire qu'au niveau de la zone d'anomalie, la fibre optique a été rapprochée de l'air durant ces quelques jours. L'hypothèse de travaux sur la piste est crédible. Un décaissement du terrain a pu être réalisé, rapprochant la fibre de l'air. D'ailleurs, il est probable que des contraintes mécaniques, imposées à la fibre entre le 6 mai et le 12 mai, soient à l'origine du décrochement constaté sur les mesures.

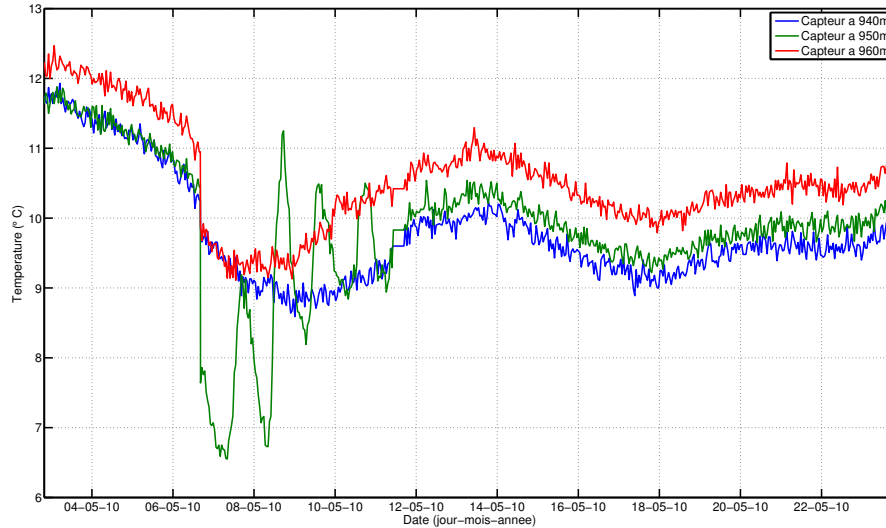


FIGURE 6.4.6: Températures en différents capteurs situés en fin de la fibre piste (proche ou dans la zone d'anomalie A6) au début du mois de mai 2010, brusques variations journalières sur le capteur à 960 m entre le 6 et le 20 mai.

6.4.1.4 Conclusion

Le modèle AJOUT, appliqué sur l'ensemble des capteurs, a permis de mettre en évidence deux grandes zones. Par recoupement avec les données brutes de température, il s'avère que l'influence thermique est différente sur ces deux zones : l'une est plus sensible à la température de l'air que l'autre. Sur le terrain, cette différence s'expliquerait par la présence d'un terrain stabilisé sur une partie du tronçon d'étude. Cette sur-couche agit comme un isolant vis-à-vis de la fibre optique.

Du fait de ces hétérogénéités du terrain, le modèle AJOUT a ensuite été appliqué sur des sections spatiales de comportement thermique plus homogène et non à l'intégralité des capteurs. A partir de la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p , différentes zones d'anomalies localisées sur quelques capteurs ont été mises en évidence.

La tendance linéaire d'évolution de \bar{d}_p a été reliée à des problèmes de mesure passés inaperçus sur l'analyse des données brutes : avec la distance, la mesure perd en qualité. Une partie des anomalies pointées a été expliquée. Certaines correspondent à des zones où la température est localement différente sur l'ensemble de la période de mesures. Une hétérogénéité locale des

matériaux ou la présence d'un écoulement peuvent expliquer ces différences. Enfin, l'une des anomalies correspond à une rupture de continuité des températures : sur une zone localisée, de brusques oscillations journalières sont visibles sur quelques jours. Simultanément, l'ensemble des capteurs a été affecté par un problème de mesure à deux reprises. Des travaux effectués à proximité de la fibre optique pourraient expliquer ce phénomène.

6.4.2 Application de MORITO

Le modèle MORITO a été appliqué sur l'ensemble des capteurs de la fibre piste et sur toute la période de mesures. La température de l'air puis celle de l'eau ont été utilisées comme variable extérieure d'entrée. MORITO appliqué avec l'air sera appelé MORITO1-air et le modèle appliqué avec l'eau MORITO1-eau. Les résultats des analyses avec MORITO1-air et MORITO1-eau sont présentés ci-après.

6.4.2.1 Application de MORITO1-air et analyse du paramètre écart d_e

Le paramètre écart d_e , qui mesure les écarts entre la température estimée et celle modélisée, est globalement assez élevé sur l'ensemble des capteurs (Fig. 6.4.7) : la valeur médiane de d_e est de $0,5^\circ\text{C}$. Les valeurs du paramètre sont comprises entre $0,3^\circ\text{C}$ et $0,9^\circ\text{C}$. Les valeurs les plus importantes, au-dessus de $0,65^\circ\text{C}$, sont exclusivement rencontrées sur les deux cents premiers mètres. Comme constaté sur l'analyse des données brutes (§6.3.2.1) et avec la méthode AJOUT (§6.4.1.1), deux zones peuvent être séparées : l'une de 0 m à 220 m, la zone 1, d_e varie entre $0,7^\circ\text{C}$ et $0,9^\circ\text{C}$ et l'autre sur le reste du linéaire, la zone 2, d_e est plus faible, compris entre $0,35^\circ\text{C}$ et $0,6^\circ\text{C}$. Rappelons que la différence de comportement thermique entre ces deux zones est liée à la présence d'un revêtement stabilisé pour une piste cyclable sur la zone 2 et non sur la zone 1.

Un coefficient de corrélation supérieur à 0,9 a été obtenu entre d_e et l'amplitude de température annuelle de température relevée aux capteurs, noté ΔT_{max} . La zone de plus fort ΔT_{max} correspond à la zone où d_e est le plus important (les deux cents premiers mètres).

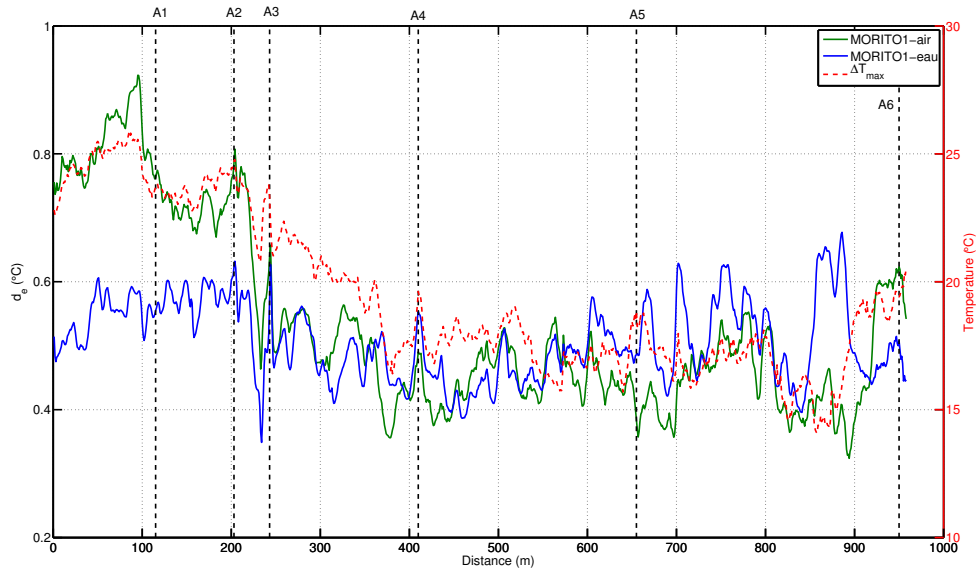


FIGURE 6.4.7: Paramètre écart d_e obtenu à partir de MORITO1-air et MORITO1-eau, comparaison avec l'amplitude annuelle de température ΔT_{max} pour l'ensemble des capteurs de la fibre piste. Les références des anomalies étudiées précédemment avec AJOUT sont indiquées (A1 à A6)

6.4.2.2 Application de MORITO1-eau et analyse du paramètre écart d_e

Les valeurs du paramètre écart d_e sont moins dispersées que dans l'analyse avec MORITO1-air (Fig. 6.4.7) : elles oscillent entre 0,35°C et 0,65°C. De plus, sur les deux cents premiers mètres, les valeurs de d_e ne sont pas plus élevées que sur le reste du linéaire. Un comportement singulier de d_e est à noter autour de 230 m. Dans cette zone, il atteint sa valeur minimale : 0,35°C. En fait, le paramètre écart d_e met en évidence une zone où l'amplitude annuelle des températures chute de quelques degrés sur quelques mètres.

Les zones d'anomalies mises en évidence avec AJOUT ont été indiquées (A1 à A6). Pour certaines de ces zones, un comportement singulier de d_e (analyse avec MORITO1-eau ou air) est constaté : il augmente pour A3 et A4 et diminue pour A5 mais seulement pour l'analyse avec l'air. Pour A3 et A4, ce comportement de d_e signifie que, ni la température de l'air, ni celle de l'eau ne permettent d'expliquer correctement la température du point. Pour le point A5, la baisse de d_e , lors de l'analyse avec l'air, signifie que la fibre est localement plus sensible à la température de l'air. D'ailleurs, une hausse d'amplitude annuelle de température est constatée. Concernant les autres zones d'anomalies, A1, A2 et A6, aucune information n'est apportée par le paramètre écart d_e .

6.4.2.3 Temps retard estimé à partir de MORITO1-air ou MORITO1-eau

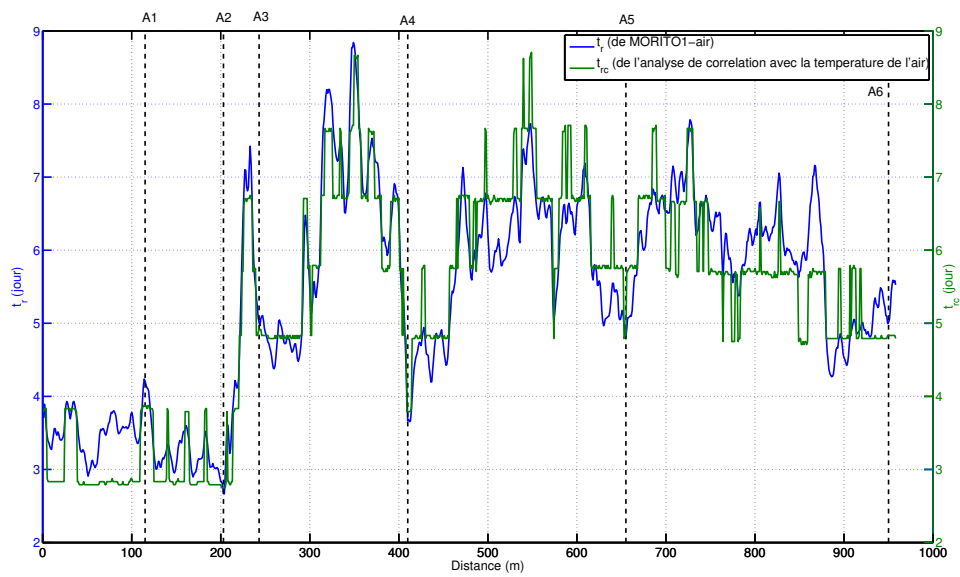
MORITO permet d'estimer le déphasage, que nous avons appelé temps retard (§4.1.3.3) et noté t_r , entre la température d'entrée (l'air ou l'eau) et la température au niveau de

la fibre optique. L'estimation du temps retard t_r pour chaque capteur par MORITO a été comparée à celle obtenue par analyse de corrélation, prise pour référence et notée t_{rc} (Fig. 6.4.8). L'analyse de corrélation permet de déterminer le décalage temporel t_{rc} qui offre la meilleure corrélation entre les deux signaux étudiés (cf. A). Nous appellerons analyse de corrélation fibre/air, l'analyse de corrélation entre la température mesurée aux capteurs de la fibre optique et celle de l'air. Tous supérieurs à 0,8, ils justifient la proximité des signaux étudiés mais n'apportent pas d'informations particulières pour cette analyse.

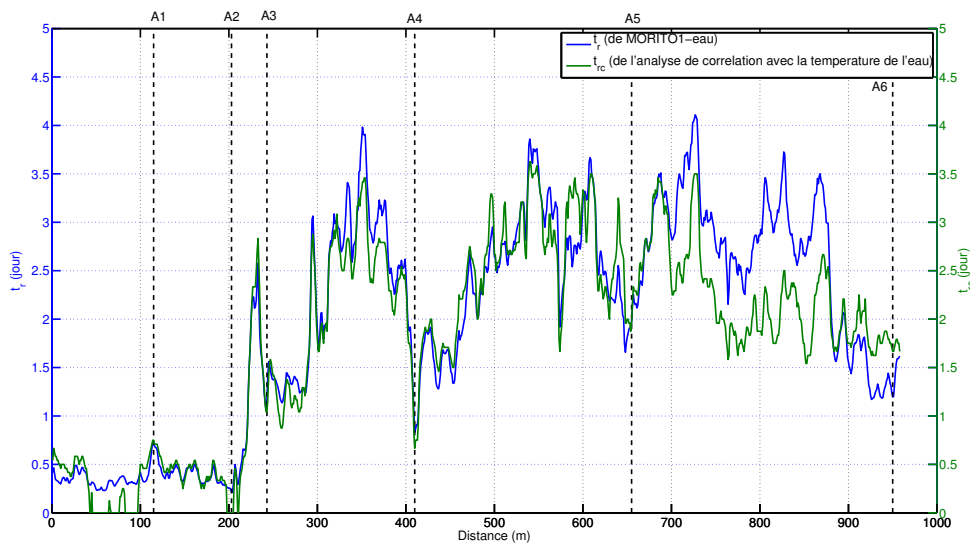
Les temps retards estimés par MORITO t_r sont fortement liés à ceux calculés par analyse de corrélation t_{rc} : pour l'analyse avec la température de l'air ou de l'eau, le coefficient de corrélation entre les estimations MORITO et celles d'analyse de corrélation dépasse 0,9.

Les temps retards, avec la température de l'air ou de l'eau, mettent clairement en évidence les zones 1 et 2. Sur la zone 1, de 0 m à 220 m, les temps retards sont deux à trois fois plus faibles que sur la zone 2. Au niveau de certaines des anomalies référencées, A3, A4 et A5, le temps retard baisse nettement. La sensibilité à la température de l'air ou de l'eau est plus forte. Hormis ces zones, les retards estimés sur la zone 2 de 220 m à 960 m sont assez variables. Les retards avec la température de l'air oscillent entre 5 jours et 9 jours. L'hétérogénéité des matériaux du terrain peut expliquer ces variations. On peut également supposer la présence de zones plus ou moins humides, influencées par un écoulement souterrain.

Le temps retard t_{rc} estimé à partir de l'analyse de corrélation fibre/air (Fig. 6.4.8a) présente une évolution en escalier. Ces marches d'escalier sont toutes de même amplitude : 1 heure. Ce comportement est à mettre en lien avec les fortes oscillations journalières de la température de l'air qui « naturellement » contraignent le retard estimé à un pas de 24 heures. t_{rc} estimé à partir de la température de l'eau ne présente pas cette évolution en marche d'escalier (Fig. 6.4.8b) car les fluctuations journalières de la température de l'eau sont à peine perceptibles. La contrainte « naturelle » sur le pas de temps est donc absente.



(a) Analyse avec MORITO1-air



(b) Analyse avec MORITO1-eau

FIGURE 6.4.8: Comparaison du temps retard, estimé par MORITO et par analyse de corrélation, entre la température mesurée au niveau de la fibre optique et celle :

a) de l'air

b) de l'eau

6.4.2.4 Conclusion

La fibre et donc les capteurs sont placés à un mètre sous le parement aval, à une distance de plus de 80 m du canal. Étant donné la position des capteurs, la température de l'air apparaît comme la source d'influence majoritaire évidente. Dans un premier temps, MORITO1-air a donc été appliqué. Ensuite, MORITO1-eau a été testé par souci d'exhaustivité.

La reproduction de la température mesurée par MORITO1-air ou MORITO1-eau est médiocre. Excepté quelques capteurs, le paramètre écart d_e est constamment supérieur à 0,4°C. L'analyse de d_e de MORITO1-air a permis de mettre en évidence la zone de la piste sans terrain stabilisé et celle avec ce dernier. Le temps retard t_r estimé par MORITO1-air ou eau a été comparé à celui obtenu par analyse de corrélation, noté t_{rc} . Les deux méthodes aboutissent à des résultats similaires.

Certaines des zones d'anomalies identifiées à partir de AJOUT sont perceptibles sur les paramètres de MORITO. Elles se traduisent par extremum local du paramètre écart d_e ou du temps retard t_r . Cependant, ces extremums ne se détachent pas nettement de l'ensemble des valeurs. MORITO ne permet pas d'identifier clairement les zones d'anomalies pointées par AJOUT. En revanche, t_r montre une variation assez importante de la phase des signaux de température. Deux hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ces variations :

- elles résultent de l'inhomogénéité des matériaux : les propriétés thermiques sont donc différentes et la sensibilité à la source d'influence thermique majoritaire, la température de l'air, est différente.
- elles résultent d'une modification des sollicitations thermiques : la température de l'air n'est plus la seule variable d'influence. La température au capteur peut notamment être influencée par la température d'un écoulement.

6.5 Résultats Contre-Canal

6.5.1 Application de AJOUT

Le modèle AJOUT a été appliqué sur l'ensemble des capteurs de la fibre contre-canal. Le paramètre de détection d_p a été calculé pour chaque jour de mesures et pour chaque capteur. Dans l'analyse des données de la fibre piste, une analyse fractionnée des capteurs a permis de mettre en évidence des zones de comportement thermique différent. AJOUT a donc été appliqué sur des sections de 220 m.

La moyenne temporelle du paramètre de détection, notée \bar{d}_p , pour l'analyse globale et l'analyse fractionnée sont présentées Fig. 6.5.1. Aucune différence notable n'est constatée entre le \bar{d}_p de l'analyse globale et celui de l'analyse fractionnée : les extremums des deux signaux sont similaires. Des tronçons inférieurs à 220 m ont été testés (jusqu'à 50 m) mais les résultats sont restés similaires. Autrement dit, le long de la fibre contre-canal, il n'y a pas de vastes zones présentant un comportement thermique différent tel que nous avons pu le mettre

en évidence pour la piste. Ce résultat n'est pas surprenant. La source d'influence thermique majoritaire est la température de l'eau du contre-canal : seuls 10 cm de gros graviers séparent la fibre de l'écoulement du contre-canal.

Tout au long du linéaire, les valeurs de \bar{d}_p sont assez élevées et varient fortement : l'écart type, de 0,04°C, est dix fois plus important que celui obtenu pour la piste et les maximums atteints sont supérieurs à 0,2°C, soit plus de deux fois supérieurs.

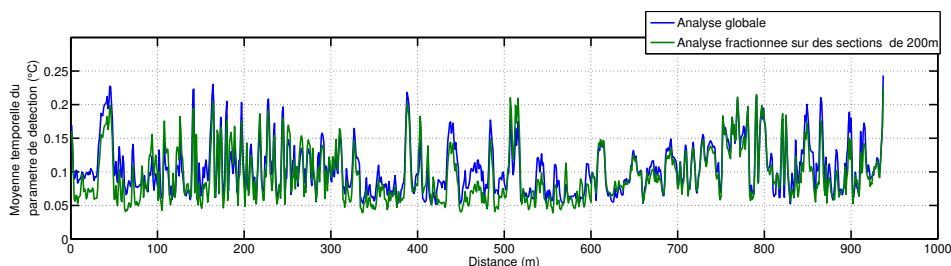


FIGURE 6.5.1: Moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p : comparaison des calculs réalisés à partir de l'ensemble des capteurs et à partir des capteurs situés sur des tronçons de 220 m

6.5.1.1 Effets liés à la mesure

L'analyse des résultats de AJOUT pour la piste a mis en évidence des effets liés à la qualité de la mesure (§6.4.1.2) : la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p présentait une évolution linéaire liée aux pertes linéaires de signal optique.

Pour le contre-canal, la tendance linéaire de \bar{d}_p n'est pas aussi évidente. Cependant, une tendance se révèle lorsque la \bar{d}_p est tracée pour les capteurs aller et retour (Fig. 6.5.2a). De plus, comme pour la piste (Fig. 6.4.3b), la différence, pour une acquisition à un instant donné, entre les mesures des capteurs aller et retour, évolue linéairement avec une pente décroissante (Fig. 6.5.2b).

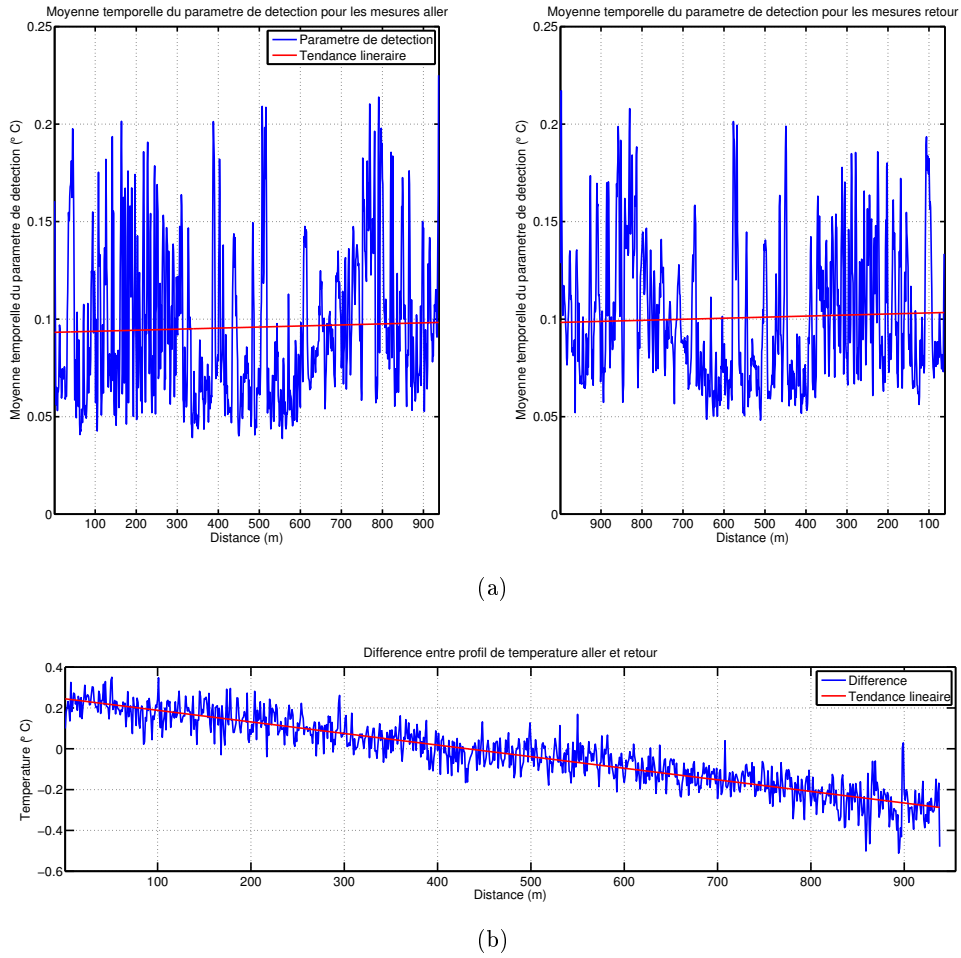


FIGURE 6.5.2: Effets liés à la mesure sur la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p et les mesures de température.

- a) \bar{d}_p calculé pour chaque capteur de la fibre optique aller (gauche) et retour (droit), mise en évidence d'une tendance linéaire à relier aux pertes linéaires de signal optique
- b) Différence entre le profil de température aller et retour mesuré à un instant donné, mise en évidence d'une tendance linéaire.

6.5.1.2 Explication des variations de la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p

\bar{d}_p est utilisé pour mettre en évidence les zones de comportement thermique différent par rapport à la majorité des capteurs. Un comportement thermique différent s'exprime par un changement de la phase et/ou de l'amplitude du signal de température. Nous allons vérifier si les zones où \bar{d}_p est important correspondent à des zones de comportement thermique différent. Pour cela, la phase et l'amplitude des signaux ont été étudiés.

L'étude de la phase a consisté à analyser le temps retard, noté t_{rc} , entre le signal de température au niveau des capteurs et celui de la température de l'eau du contre-canal. t_{rc} a été

calculé à partir d'une analyse de corrélation entre les signaux désaisonnalisés de température au niveau des capteurs et dans l'eau (Fig. 6.5.3). Pour la grande majorité des capteurs, le coefficient de corrélation avec la température de l'eau du contre-canal est supérieur à 0,85. Étant donné la proximité de la fibre contre-canal, ce résultat était prévisible. Cependant, pour un ensemble de capteurs, situés dans le dernier tiers du linéaire, la corrélation chute en-dessous de 0,7. Pour certains capteurs, situés autour de 850 m et 900 m, la valeur du coefficient de corrélation avoisine zéro. La température en ces points présente un comportement tout à fait particulier (Fig. 6.3.7b).

L'ensemble de ces capteurs, de corrélation inférieure à 0,7, constituent des zones d'anomalies. Il est anormal que la température mesurée en ces zones ne partage que très peu ou aucune information avec la température de l'eau du contre-canal : la fibre n'est qu'à 10 cm du contre-canal. Ces zones de non corrélation avec la température de l'eau du contre-canal, appelées zones d'anomalies de corrélation, ne sont pas clairement mises en évidence par \bar{d}_p (Fig. 6.5.5a-Haut).

Pour les capteurs de coefficient de corrélation supérieur à 0,7, t_{rc} varie entre 1 heure et 7 heures. La position de la fibre optique, proche du contre-canal, justifie les faibles retards de quelques heures. Considérons les capteurs pour lesquels le temps retard t_{rc} estimé se situe à un extremum :

- ceux de t_{rc} faible, inférieur ou égal à 1 heure : ils constituent 14% des capteurs
- ceux de t_{rc} élevé, supérieur ou égal à 5 heures : ils constituent environ 10% des capteurs.

Les zones dans lesquelles t_{rc} estimé est faible (vis à vis du critère imposé) seront appelées zones d'anomalies retard faible. Celles dans lesquelles le retard estimé est élevé seront appelées zones d'anomalies retard élevé. Dans la grande majorité des zones d'anomalies retard, faible ou élevé, la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p présente une valeur élevée :

- 97% des capteurs ayant un temps retard inférieur ou égal à 1h ont un \bar{d}_p supérieur à 0,1°C (Fig. 6.5.5a-Bas),
- 85% des capteurs ayant un temps retard supérieur ou égal à 1h ont \bar{d}_p supérieur à 0,1°C (Fig. 6.5.5a-Bas).

A titre d'indication, 0,1°C est la valeur maximale de \bar{d}_p qui a été obtenue sur la piste (Fig. 6.4.5a).

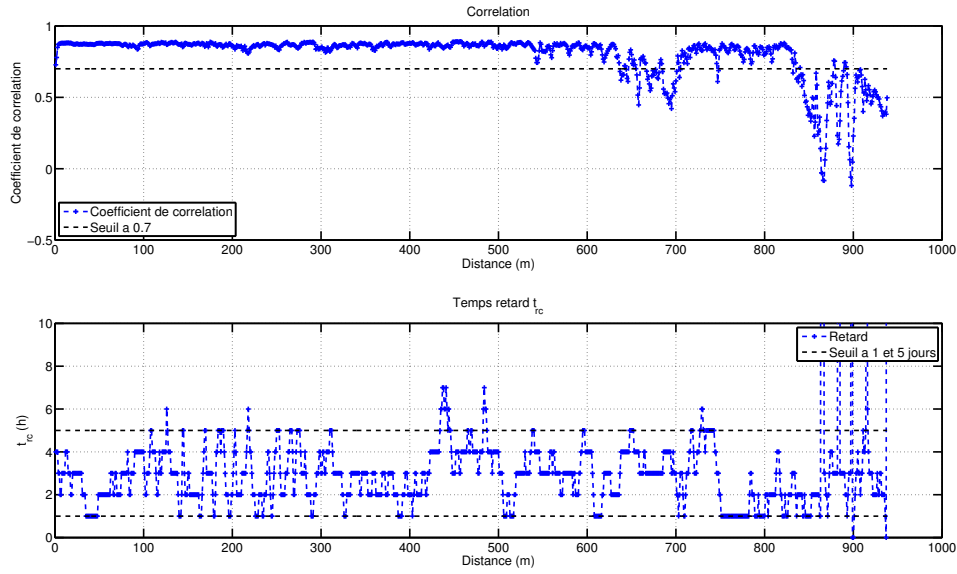


FIGURE 6.5.3: Analyse de corrélation entre les mesures de température aux capteurs et celles de l'eau

L'amplitude est l'autre paramètre qui peut être utilisé pour caractériser un signal. L'amplitude journalière de chaque capteur a été calculée. La moyenne des valeurs obtenues pour chaque capteur est représentée Fig. 6.5.4a. L'évolution de ces valeurs moyennes représentées sur tout le linéaire partagent des similarités avec celle de la moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p (Fig. 6.5.4b). Dans certaines zones, symbolisées par des doubles flèches (Fig. 6.5.4a), la variabilité de la moyenne des amplitudes journalières augmente significativement. Il en est de même pour \bar{d}_p dans ces zones. Certaines hausses de l'amplitude journalière sont corrélées avec celles de \bar{d}_p (traits verticaux pointillés). \bar{d}_p pour les capteurs ayant les plus fortes (Population 1) ou les plus faibles (Population 2) moyennes d'amplitudes journalières a été étudié.

Population 1 Les capteurs ayant une moyenne d'amplitude supérieure à $0,65^\circ\text{C}$ ont été sélectionnés : ils représentent environ 10% des capteurs. \bar{d}_p , pour 90% de ces capteurs, est supérieur à $0,1^\circ\text{C}$ (Fig. 6.5.5b-Haut).

Population 2 Les capteurs ayant une moyenne d'amplitude inférieure à $0,28^\circ\text{C}$ ont été sélectionnés : ils représentent environ 10% des capteurs. \bar{d}_p , pour 93% de ces capteurs, est supérieur à $0,1^\circ\text{C}$ (Fig. 6.5.5b-Haut) : les capteurs en zones d'anomalies de corrélation ne sont pas comptés.

Les zones contenant les capteurs des populations 1 seront appelées zones d'anomalies d'amplitude élevée et celles contenant les capteurs des populations 2 seront appelées zones d'anomalies d'amplitude faible.

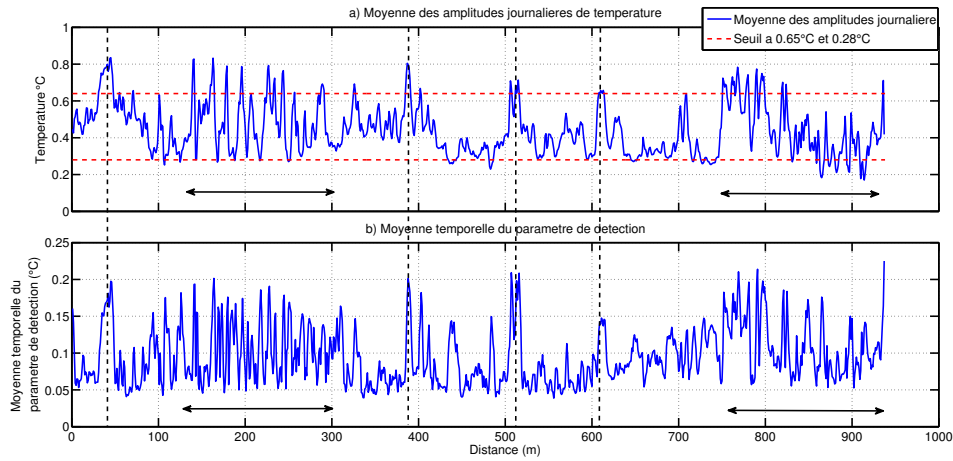


FIGURE 6.5.4: Moyenne de l'amplitude journalière pour chaque capteur, comparaison avec la moyenne temporelle du paramètre de détection

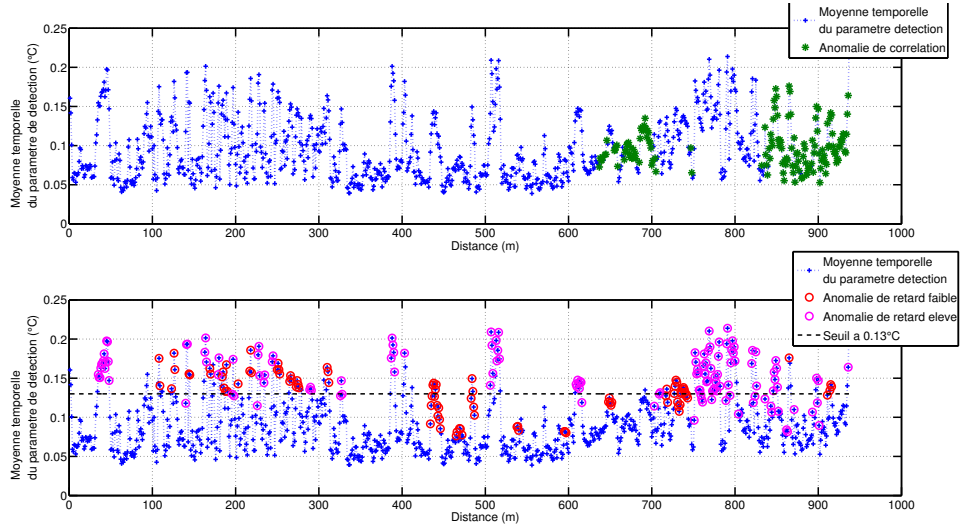
Pour près de 75% des capteurs présentant un \bar{d}_p supérieur à $0,1^\circ\text{C}$, des anomalies de corrélation, de retard ou d'amplitude ont été constatées. Notons que ce seuil de $0,1^\circ\text{C}$ a été fixé en comparaison avec les résultats obtenus pour la piste : les plus fortes valeurs de \bar{d}_p ne dépassaient pas $0,1^\circ\text{C}$. Si ce seuil est relevé à $0,13^\circ\text{C}$ (Fig. 6.5.5b-Bas) pour ne conserver que les plus fortes valeurs de \bar{d}_p (20% des capteurs), alors les anomalies de corrélation, retard et amplitude expliquent près de 95% de ces valeurs.

6.5.1.3 Conclusion

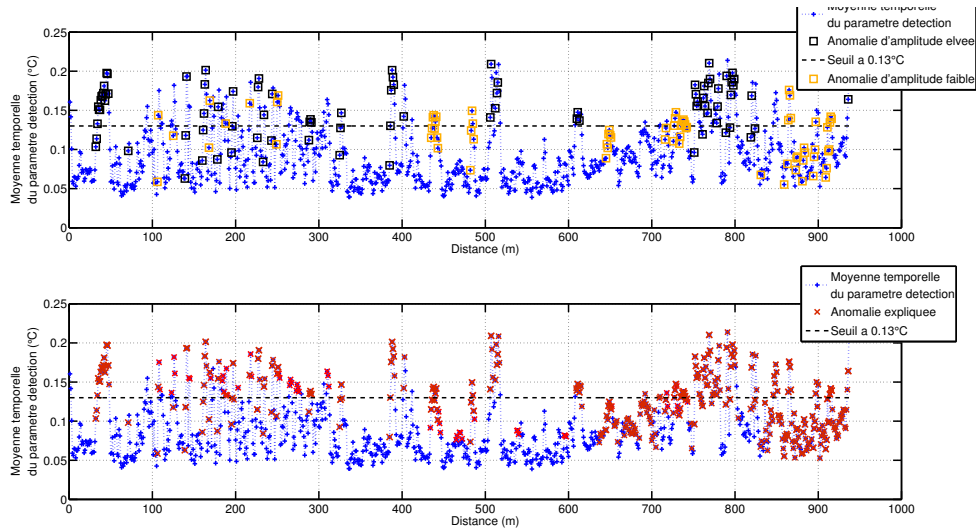
Pour les données de la fibre contre-canal, il n'est pas nécessaire d'appliquer AJOUT par tronçons : le modèle peut être appliqué avec l'ensemble des capteurs. Contrairement à la Piste, il n'existe pas de vastes zones ayant un comportement thermique similaire mais différent de la majorité des autres capteurs.

La moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p est globalement élevée et dispersée tout au long du linéaire en comparaison avec les résultats obtenus pour la piste. Comme pour la piste, les effets liés aux pertes linéaires ou singulières de signal optique sont également visibles. Cependant, leur impact sur \bar{d}_p est moins perceptible.

Pour tenter d'expliquer les fortes variations de \bar{d}_p , une analyse de la phase et de l'amplitude journalière des signaux de température au niveau des capteurs, dénommés signaux capteurs, a été menée. La phase des signaux capteurs a été comparée à celle du signal de la température de l'eau, le signal eau. La température de l'eau est la source d'influence thermique principale : 10 cm de gros gravier sépare la fibre de l'écoulement du contre-canal. Le déphasage entre les signaux capteurs et le signal eau a été estimé par intercorrélation. Cette analyse a permis de mettre en évidence des zones d'anomalies de corrélation. Dans ces zones, la température



(a) Haut : Tracé de \bar{d}_p et représentation des capteurs présentant une anomalie de corrélation ;
 Bas : Tracé de \bar{d}_p et représentation des capteurs présentant une anomalie de retard faible ou élevé



(b) Haut : Tracé de \bar{d}_p et représentation des capteurs présentant une anomalie d'amplitude élevée ou faible; Bas : Tracé de \bar{d}_p et représentation des capteurs pour lesquels une anomalie de corrélation, de retard ou d'amplitude a été constatée

FIGURE 6.5.5: Moyenne temporelle du paramètre de détection \bar{d}_p pour chaque capteur et représentation des capteurs pour lesquels une anomalie de corrélation, de retard ou d'amplitude a été constatée

mesurée n'est que très peu ou pas du tout influencée par la température de l'eau du contre-canal. AJOUT n'est que faiblement sensible à ces zones qui, d'un point de vue physique, sont des zones d'anomalies. Les analyses sur la phase et l'amplitude journalière des signaux capteurs ont permis d'expliquer une partie des fortes valeurs de \bar{d}_p . La majorité d'entre elles est liée, soit à un déphasage faible ou important avec le signal eau, soit à une amplitude journalière faible ou élevée. Finalement, si \bar{d}_p est aussi variable le long du contre-canal, c'est parce que les conditions thermiques autour de la fibre optique le sont aussi.

6.5.2 Application de MORITO

Le modèle MORITO a été appliqué sur l'ensemble des capteurs de la fibre contre-canal et sur toute la période de mesures. La fibre optique contre canal se situe à proximité de l'écoulement du contre-canal : 10 cm de gros gravier l'en sépare. Dans ces conditions, la température de l'eau du contre-canal apparaît comme la source d'influence majoritaire au niveau de la fibre optique. MORITO1-eau a donc été appliqué avec la température de l'eau du contre-canal comme variable extérieure d'entrée.

Sur l'ensemble du linéaire, les valeurs du paramètre écart d_e sont comprises entre 0,3°C et plus de 1°C (Fig. 6.5.6). Les plus fortes valeurs sont atteintes dans le dernier tiers du linéaire. Sur ce graphique (Fig. 6.5.6), on a représenté les capteurs dont la corrélation avec la température de l'eau du contre canal est faible. La mesure de corrélation qui a été utilisée est identique à celle présentée §6.5.1.2.

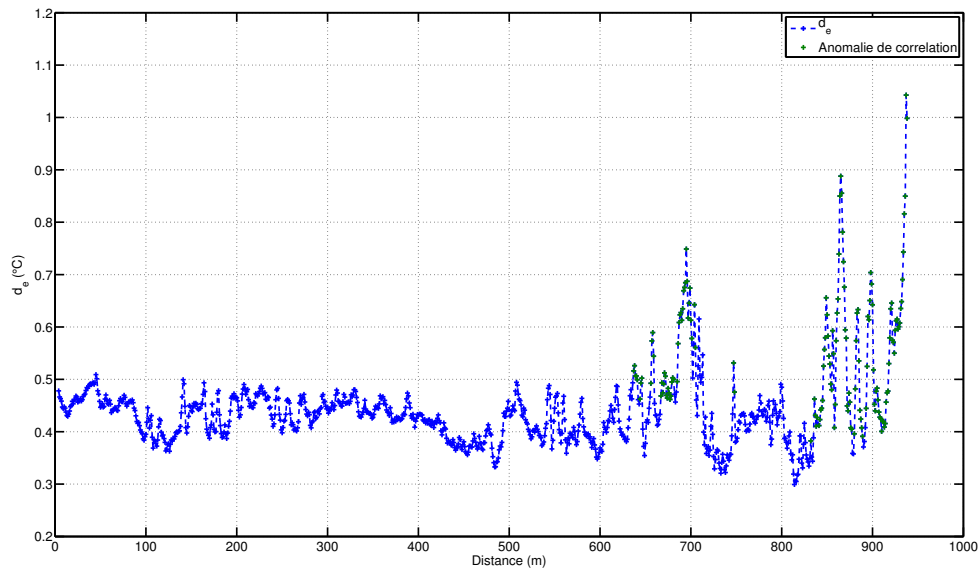


FIGURE 6.5.6: Paramètre écart d_e obtenu à partir de MORITO en utilisant la température de l'eau du contre canal comme variable d'entrée. Les capteurs dont la corrélation avec la température du contre canal est inférieure à 0,7 (anomalie de corrélation) sont indiqués.

Il s'avère que les capteurs ayant un coefficient de corrélation faible, inférieur à 0,7, sont

également ceux pour lesquels les plus hautes valeurs de d_e sont atteintes. Comme il a été mentionné précédemment, ces capteurs sont dans une zone d'anomalies de corrélation avec la température de l'eau du contre-canal. Une source d'influence, autre que celle de la température du contre-canal intervient majoritairement. Que d_e soit élevé en ces zones n'est pas surprenant. Rappelons que ce paramètre mesure l'écart entre la température modélisée et celle mesurée. Or la température modélisée est construite à partir de la température de l'eau du contre-canal. Dans les zones d'anomalies de corrélation, le modèle ne possède pas l'information adéquate pour reconstruire la température. Donc d_e est important. En dehors de ces zones d'anomalies de corrélation, d_e oscille entre 0,3°C et 0,5°C, aucune zone singulière n'apparaît.

Ainsi, l'analyse du paramètre écart d_e du modèle MORITO1-eau permet de mettre en évidence les zones d'anomalies de corrélation avec la température du contre-canal. Notons que celles-ci apparaissent plus distinctement qu'avec AJOUT (Fig. 6.5.5a-Haut). Nous avons vu que l'origine de ces anomalies est très certainement liée à l'influence de la nappe phréatique (§6.3.2.2). Ces zones d'anomalies étant identifiées et liées à une source thermique autre que le GCA, elles seront écartées dans la suite des analyses.

Le temps retard t_r estimé par MORITO1-eau, entre le signal de température mesuré aux capteurs et celui de la température de l'eau du contre-canal, a été comparé au temps retard t_{rc} obtenu par analyse de corrélation présentée dans l'annexe (A). Pour le temps retard estimé par analyse de corrélation, on retrouve l'évolution en escalier de t_{rc} le long du linéaire. Ces marches d'escalier, de 1h d'amplitude ont déjà été observées pour la piste (§6.4.2.3) : elles proviennent des oscillations journalières. Concernant la comparaison des valeurs t_r et t_{rc} , celles-ci apparaissent voisines (Fig. 6.5.7) : le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7.

A nouveau, MORITO et l'analyse de corrélation apportent des résultats similaires.

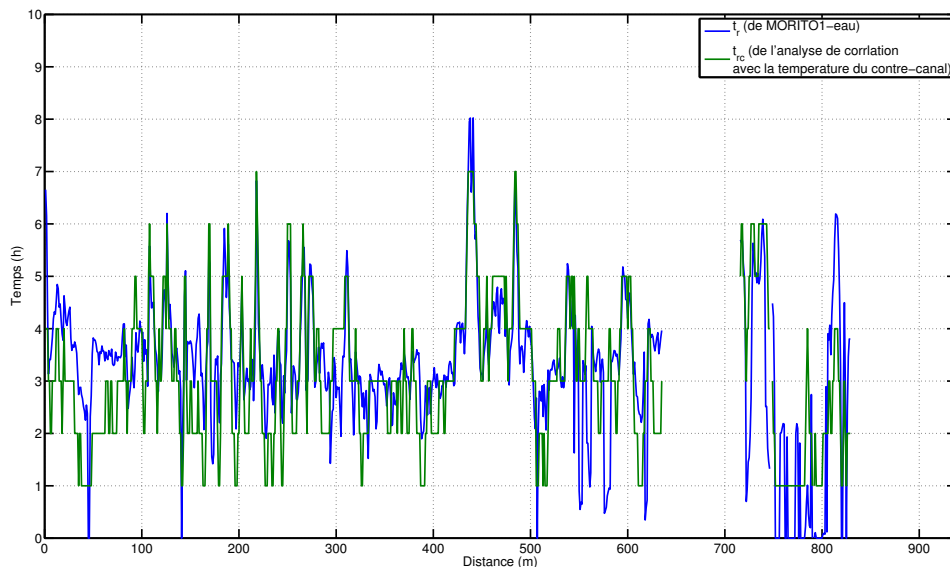


FIGURE 6.5.7: Temps retard entre la température mesurée au niveau de la fibre optique et celle de l'eau du contre-canal estimé par MORITO (t_r) et par analyse de corrélation (t_{rc})

Partant de ce fait, l'analyse de corrélation a été répétée mais sur des périodes plus courtes. L'objectif est d'observer les variations de t_{rc} au cours du temps pour détecter d'éventuels changements de comportement thermique au niveau de la fibre dues à l'arrivée d'une fuite. La période de mesure a été divisée en intervalles de 50 jours. Neuf analyses de corrélation ont été effectuées (Fig. 6.5.8).

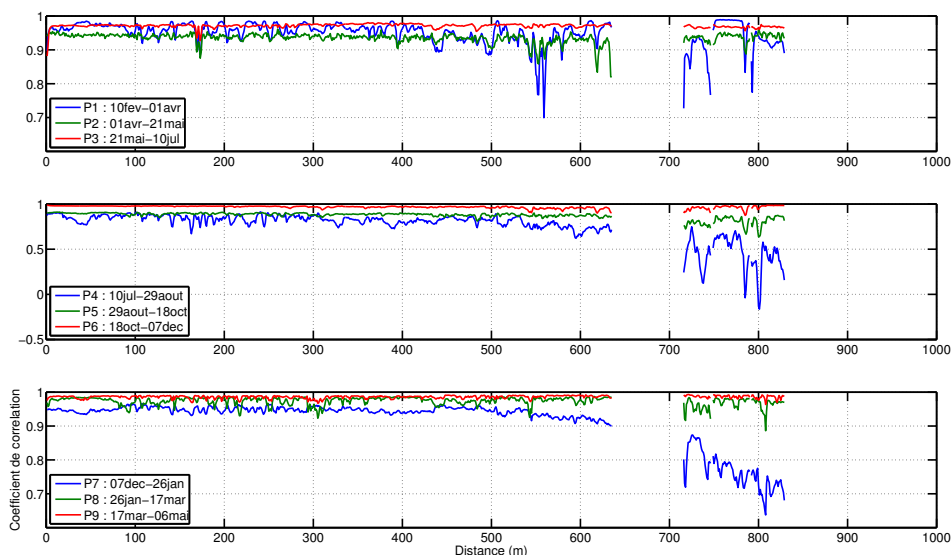


FIGURE 6.5.8: Coefficient de corrélation entre les mesures de température aux capteurs et celles dans l'eau du contre-canal calculés sur différentes périodes d'observation

Pour toutes les périodes, la corrélation est globalement stable entre 0m et 630 m. Seules

deux petites zones de baisse se détachent : une zone autour de 170m pour la période P2, et une autre autour de 550 m pour les périodes P1 et P2. En revanche, les résultats sont beaucoup plus dispersées pour les capteurs situés après 700 m. Pour les périodes P1, P4 et P7, le coefficient de corrélation est plus faible.

Suivant les périodes, la corrélation globale (valeur médiane) avec la température de l'eau du contre-canal fluctue entre 0,9 et 0,99. Excepté pour les périodes P4 et P5, la valeur médiane de corrélation sur le linéaire est supérieure à 0,93. Pour expliquer la baisse de corrélation globale pour P4 et P5, la mesure de la température de l'eau du contre-canal doit être discutée. Cette dernière a été mesurée à l'extrémité amont du tronçon d'étude par une sonde placée sur le lit du contre-canal. En raison du transport de sédiment dans le contre-canal, la sonde s'est retrouvée à certaines périodes enlisées. Pour la période P4 et une partie de celle de P5 où les valeurs de corrélation sont globalement faibles, les fluctuations de température journalières sont plus amorties que celles mesurées par la fibre (Fig. 6.5.9). La sonde était alors vraisemblablement plus isolée des variations journalières de température que ne l'était la fibre optique à cause du capteur. Les conditions fluctuantes de mesures seraient responsables des variations globales de corrélation constatées.

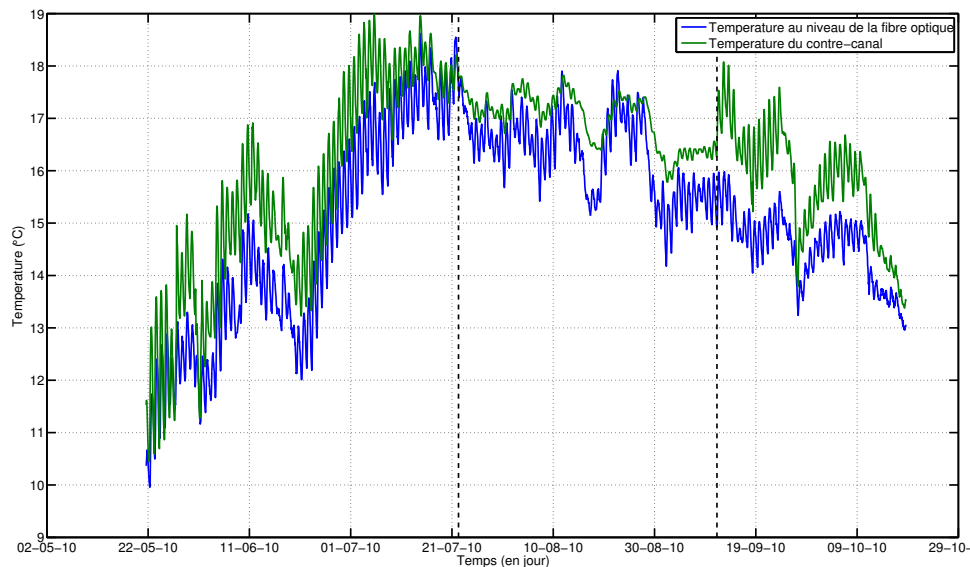


FIGURE 6.5.9: Température mesurée au niveau de la fibre optique et dans le contre-canal lors des périodes P3 à P6 : baisse de sensibilité aux variations journalières de la mesure de température du contre-canal sur une période englobant P4 et une partie de P5 (période indiquée entre les deux traits verticaux)

Les problèmes liés à la mesure de la température de l'eau du contre-canal n'explique pas les faibles valeurs de corrélation constatées pour certains capteurs et à certaines périodes :

- les capteurs situés à 170 m pour la période P2
- les capteurs situés à 550 m pour les périodes P1 et P2

- les capteurs situés au-delà de 700 m pour les périodes P1, P4 et P7

Pour chacune de ces zones et aux périodes précisées uniquement, la température mesurée subit d'autres influences thermiques que celle de la température du contre-canal. Ces zones de baisse de corrélation, variables dans le temps, n'étaient pas apparues lors de l'analyse de corrélation sur l'ensemble de la période de mesures.

6.5.2.1 Conclusion

MORITO1-eau a été appliqué sur les données de la fibre contre-canal. La température de l'eau du contre-canal, source d'influence thermique principale, a été utilisée comme variable extérieure d'entrée du modèle. Tout d'abord, l'analyse du paramètre écart d_e a permis de mettre en évidence, et plus distinctement que AJOUT, des zones de très faibles corrélations avec la température du contre-canal. Ces zones, déjà repérées et discutées dans l'analyse des données brutes et de AJOUT, sont très certainement sous l'influence de la nappe phréatique (§6.3.2.2). Ensuite, le temps retard de MORITO1-eau, t_r , a été comparé à celui estimé par analyse de corrélation t_{rc} . Comme nous l'avons déjà constaté pour la piste, les temps retards obtenus par l'une ou l'autre des méthodes apportent des informations concordantes. Enfin, pour approfondir l'analyse, la période de mesures a été divisée en sous-période de 50 jours et des analyses de corrélation ont été effectuées sur chacune de ces sous-périodes. Ces analyses ont soulevé une discussion sur la qualité de la mesure de température d'eau du contre-canal. Les conditions de mesure n'ont pas été équivalentes sur l'ensemble de la période de mesures. Outre ces problèmes de mesures, un certain nombre d'anomalies thermiques, fluctuantes au cours de la période de mesures, ont été mises en évidence.

6.6 Synthèse des résultats de la campagne de mesures

L'installation de Kembs a été utilisée et complétée lors de cette étude pour tester les modèles de caractérisation de fuite AJOUT et MORITO. Une campagne de mesures, étalée sur 2010 et 2011, a permis d'acquérir un ensemble d'informations sur le comportement hydraulique et thermique de l'ouvrage. Outre les mesures de température par fibre optique, des examens visuels ont été menés et les grandeurs caractéristiques du comportement hydraulique de la digue, telles que les conditions aux limites de charge ou la piézométrie dans l'ouvrage, ont été mesurées. L'ensemble de ces données a été analysé dans le but de répondre à plusieurs questions :

- des fuites sont-elles présentes sur le linéaire étudié (appelé tronçon d'étude) ?
- où se situent ces fuites ?
- les données de température mesurées par l'intermédiaire des fibres optiques permettent-elles de caractériser les écoulements à l'aide des modèles AJOUT et MORITO ?

La caractérisation des fuites comprend leur détection, leur positionnement et l'évaluation de leur intensité, en terme de débit. Les examens visuels ont permis de répondre à la première question avec certitude. Des fuites ont été repérées sur le linéaire ausculté et principalement sur les cents premiers mètres de la partie amont du tronçon d'étude. Au cours des différents examens visuels, nous avons pu constater que la position et le nombre de ces fuites varient dans le temps. A chaque fois, les fuites repérées se situaient juste au-dessus du niveau d'eau du contre-canal. Des fuites débouchent très certainement sous la surface libre du contre-canal et ont échappé à nos examens. La température des fuites localisées a pu être mise en lien avec celle du GCA (le canal). Cette corrélation, parfois assez forte, tend à supposer la présence d'un écoulement de vitesse non négligeable. Ces suppositions se sont trouvées confirmées par la mesure du temps de traversée de l'écoulement de fuite du canal au contre-canal. Cette mesure, réalisée à l'aide de traceurs dans une section en travers de la digue équipée de plusieurs piézomètres, donne une évaluation de la vitesse moyenne de traversée de l'ordre de 5.10^{-4} m/s à 1.10^{-3} m/s.

L'analyse du niveau piézométrique le long du tronçon d'étude ne met pas en évidence d'événements majeurs. Elle indique un niveau de nappe situé globalement entre 234 m (NGF) et 236 m (NGF) soit un niveau supérieur de 1,50 m à 3,50 m au niveau du plafond du GCA. De plus, le niveau de la nappe apparaît plus élevé aux deux extrémités du tronçon d'étude. Ces observations témoignent de la présence d'une nappe dans la digue située à un niveau supérieur de celui du contre-canal : il y a donc un écoulement à travers la digue et vers le contre-canal. Notons qu'à l'extrémité du tronçon d'étude, les mesures piézométriques indiquent que la nappe se situe à une distance comprise entre 50 cm et 1 m de la fibre optique placée sous la piste. Il est raisonnable de penser que cet éloignement diminue la capacité de détection de la fibre optique.

Outre les mesures de charges hydrauliques, les piézomètres ont permis de mesurer la température en profondeur de la digue. Les signaux de température enregistrés montrent une variabilité des conditions thermiques. Ces variations sont vraisemblablement liées à l'intensité des écoulements traversant le piézomètre. D'ailleurs dans les piézomètres de la section au PK178.633, où la vitesse d'écoulement a été évaluée par une méthode de traçage entre 5.10^{-4} m/s à 1.10^{-3} m/s, le signal de température est fortement corrélé avec celui de la température de l'eau du GCA. Cette corrélation est encore plus élevée dans le piézomètre qui enregistre le niveau piézométrique maximal sur le tronçon d'étude.

Dans la section en travers au PK178.633, MORITO et DamTemp, logiciel intégrant le modèle de Johansson et Hellström (2001), ont été appliqués aux données de température mesurées dans les piézomètres. Les estimations de vitesse de MORITO se sont avérées similaires à celles obtenues par méthode de traçage alors que celles de DamTemp sous-estiment d'une puissance de dix les vitesses d'écoulement. Le modèle ne semble pas adapté pour mod-

éliser les transferts thermo-hydrauliques au sein d'une digue où les contrastes de perméabilité sont faibles comme c'est le cas de la digue de Kembs, constituée essentiellement de gravier.

Concernant les mesures de température par fibre optique, l'analyse des données brutes par représentation sous forme d'image donne accès à quelques informations.

Pour la fibre sous la piste, les capteurs situés sur une section d'environ 200 m présentent une amplitude annuelle de température plus élevée. Cette hausse a été expliquée par une différence des matériaux en place. Hormis sur ces 200 m, une couche d'environ 30 cm de terrain stabilisé a été ajoutée et « isole » la fibre optique.

Pour la fibre dans le contre-canal, les mesures de température sont beaucoup plus homogènes. Le contre-canal, situé à 10 cm de la fibre optique, homogénéise les températures le long de la section. Cependant, des zones contrastées apparaissent nettement. En ces points, la température est peu ou non corrélée avec celle du contre-canal. Une autre source d'influence thermique que l'eau du contre-canal est présente dans ces zones d'anomalies de corrélation avec la température du contre-canal. Étant donné le déphasage de ces points avec la température du GCA, plus de 70 jours, il apparaît peu probable que cette influence thermique proviennent des eaux de percolation à travers la digue. Il est plus crédible d'imputer ces variations à la nappe phréatique rhénane dont le niveau fluctue au cours de l'année. Suivant les périodes, cette nappe peut venir noyer la fibre optique et en perturber le régime thermique normalement dicté par la température du contre-canal. Ces zones d'anomalies de corrélation sont situées sur les cent cinquante premiers mètres amont du tronçon d'étude, là où ont été repérés la plupart des écoulements identifiés, probablement à tort comme fuites par examen visuel.

Les modèles AJOUT et MORITO détectent ces zones d'anomalies de corrélation dans le contre-canal. Néanmoins, MORITO à travers le paramètre écart, les met plus en évidence qu'AJOUT. Le paramètre écart de AJOUT et le temps retard de MORITO sont fortement variables, le long de la fibre contre-canal. Cette forte variabilité a pu être mise en lien avec une variabilité des conditions thermiques et notamment du déphasage entre les mesures de température au niveau de la fibre optique et dans le contre-canal. Étant donné que seul 10 cm de gros gravier sépare la fibre optique du contre-canal, ces différences de déphasage apparaissent suspectes. Ces variations sont très certainement dues à l'arrivée de fuite en provenance du GCA. Une confirmation de cette hypothèse n'a pu être établie.

A partir des données de la fibre optique piste, les modèles mettent tous les deux en évidence la zone de 200 m non recouverte de terrain stabilisé. Cette zone est plus clairement identifiable que sur les données brutes. Ce résultat montre tout du moins la sensibilité de AJOUT ou MORITO aux variations de la nature du terrain. Des zones d'anomalies sont pointées communément par l'un et l'autre des modèles. Elles ont pu être expliquées par une variation locale des conditions thermiques qui peuvent être dues à une hétérogénéité du terrain ou à la présence d'un écoulement. Ces hypothèses n'ont pu être confirmées.

Outre ces résultats, l'application de AJOUT ou MORITO, sur les données de température de la fibre piste ou contre-canal, nous a apporté des informations intrinsèques à ces deux modèles. AJOUT est assez sensible à la qualité de la mesure : le paramètre de détection présente une évolution linéaire, liée aux pertes optiques linéaires . De plus, AJOUT a clairement mis en évidence une discontinuité de la mesure assez localisée dans le temps et dans l'espace. Quant à MORITO, le temps retard estimé par le modèle s'est avéré assez semblable à celui obtenu par une analyse d'intercorrélation.

Conclusion

Pour conclure, la portion étudiée de la digue du canal de force motrice de Kembs comporte des fuites de faibles débits dont la position et le nombre varie dans le temps. Ce sont ces fuites qui, vraisemblablement, sont responsables des variations des conditions thermiques le long de la fibre optique placée dans le contre-canal. Cette variabilité des conditions thermiques a été mise en évidence par les modèles AJOUT et MORITO. Les fuites en provenance du GCA ne constituent pas la seule source perturbatrice des conditions thermiques. La nappe phréatique rhénane, dont la profondeur varie avec le temps, affleure au fond du contre-canal et vient également influencer, voire imposer, la température au niveau de la fibre optique. La situation hydraulique est complexe. AJOUT et MORITO pointent également quelques anomalies thermiques au niveau de la fibre optique située sous la piste. Ces anomalies sont beaucoup moins nombreuses que celles observées pour la fibre optique contre-canal. La position de la fibre optique piste justifie très certainement cette différence. En effet, elle se situe globalement au-dessus de la nappe donc elle n'est pas au contact de la zone d'écoulement.

Avec d'une part, une situation hydraulique complexe et d'autre part, une fibre optique éloignée des écoulements, l'évaluation des modèles AJOUT et MORITO sur les données des fibres optiques du site de Kembs est complexe.

Le principal problème reste l'identification des anomalies pointées par les modèles. Et révéler la présence de fuites n'est pas évident. L'examen visuel, la thermographie infrarouge ou encore l'utilisation de traceur sont des moyens qui permettent de confirmer avec certitude la présence de fuites. Ces techniques, qui ont été mises en œuvre, ont cependant leurs limites : les écoulements sous la surface libre du contre-canal ne sont pas détectables et leur résultat est trop ponctuel dans le temps, au vu de la variation de la position des fuites.

Sur le site de Kembs et avec les données des fibres optiques obtenues durant la campagne de mesures, la performance des modèles s'arrête à la détection, ils ne permettent pas de quantifier les écoulements. Rappelons toutefois que des résultats intéressants de quantification ont été obtenus à l'aide de MORITO, appliqué aux données de température mesurée dans les piézomètres. Les estimations de vitesse d'écoulement de MORITO concordent avec celles obtenues par méthode de traçage.

Conclusions et perspectives

Conclusions sur les modèles utilisés pour la caractérisation des fuites

Pour la caractérisation des fuites, i.e. leur détection et quantification, nous avons utilisé deux modèles. Un modèle de détection, AJOUT développé par Khan *et al.* (2010), a été testé pour la quantification. Un autre modèle, MORITO, inspiré des modèles impulsionnels de Bonelli (2009), Radzicki (2009) et Penot *et al.* (2005) a été développé. La sensibilité de ces modèles aux variations de vitesses de fuites a été démontrée, dans un premier temps, sur des données thermiques, obtenues par simulation numérique 2D, aux éléments finis d'une digue de section trapézoïdale. Ensuite, les données de température de deux sites ont été exploitées pour poursuivre le test des modèles de quantification : celles de la plateforme PEERINE, site semi-contrôlé, et celles de Kembs, site non-contrôlé. Des résultats de quantification de vitesses de fuites ont été obtenus à partir des données de PEERINE. Sur ces données, MORITO a permis de quantifier certains écoulements. Les estimations de vitesse de MORITO concordent avec celles obtenues par d'autres moyens de mesures de la vitesse, telle que la technique de traçage coloré. Sur Kembs, des difficultés ont été rencontrées, même au niveau de la détection, certainement en raison d'un mauvais positionnement des fibres optiques. Les modèles ont mis en évidence des zones d'anomalies mais il a été difficile de confirmer celles-ci sur le terrain.

MORITO et AJOUT sont des modèles dont l'utilisation est simple dans le sens où aucun paramètre physique relatif aux écoulements ou aux sols traversés ne doit être renseigné pour obtenir un premier diagnostic des zones d'anomalies et de l'intensité de l'écoulement. Celle-ci n'est d'ailleurs pas transcrite en terme de vitesse. Pour MORITO, la transcription est possible mais nécessite la connaissance de deux propriétés thermiques, l'une relative à l'eau et l'autre au sol.

Cependant, l'information initiale, non transcrite en terme de vitesse, est déjà une information riche. MORITO, comme AJOUT, met en relief des zones d'anomalies qui peuvent être classées, en fonction de l'intensité du paramètre écart et du paramètre de détection. Ces informations doivent être confirmées, sur le terrain, par des examens visuels ou l'emploi de techniques spécifiques, telles que la thermographie ou le traçage chimique. Les mesures de vitesse obtenues, par ces techniques de terrain, peuvent être utilisées pour caler les modèles

AJOUT et MORITO et déterminer des seuils d'alertes. Une fois le calage effectué et les seuils fixés, une surveillance des zones de fuites déjà repérées peut être effectuée à l'aide de MORITO et AJOUT.

Finalement, à travers les données analysées, nous avons montré la possibilité de quantifier des fuites à travers un ouvrage hydraulique en remblai, par mesures de température à l'aide des modèles MORITO et AJOUT.

Discussions sur la position de la fibre optique

Pour caractériser des fuites par mesures de température, la première exigence porte sur la mesure et notamment sa localisation. Dans ce travail, nous avons essentiellement exploité des données de température mesurées par fibre optique. Ce type de mesure est adapté aux objectifs recherchés : la surveillance d'ouvrages à long linéaire.

La fibre optique doit être positionnée, dans l'ouvrage, à un endroit qui sera traversé par les éventuelles fuites. Au cours de notre étude, deux positions ont été étudiées vis à vis de la caractérisation des fuites : une position, dite amont, où la fibre est placée derrière le parement amont et une position, dite aval, où elle est positionnée sous le pied de talus aval.

Position amont

La position amont n'est envisageable que pour les ouvrages ayant une étanchéité amont, associée à un dispositif de drainage, tel qu'un tapis drainant sous l'étanchéité. La fibre peut alors être placée en pied de tapis drainant, où elle interceptera toute fuite, sous réserve d'un fonctionnement adéquat du dispositif de drainage. Dans ce cas, le chemin parcouru par la fuite, pour rejoindre la fibre optique, est relativement court. Sa longueur caractéristique est de l'ordre de celle du parement amont. Ainsi, le signal thermique d'intérêt, relatif à la température de l'eau du réservoir (ou canal), est peu perturbé, lorsqu'il parvient aux capteurs de la fibre optique. Ce trajet limité facilite la caractérisation des fuites par mesures de température. Sur la plateforme expérimentale PEERINE où la configuration « position amont » a été testée, les fuites contrôlées ont été efficacement détectées et un classement par ordre d'importance de débit a pu être réalisé par AJOUT.

Position aval

La position aval est préconisée lorsque la digue ne possède pas d'étanchéité amont, associée à un dispositif de drainage ou lorsqu'il est inenvisageable, pour des raisons techniques ou économiques, de placer la fibre à l'amont. Concernant le positionnement exact de la fibre, en particulier sa profondeur d'enfouissement, nous avons vu à travers l'analyse des données de Kembs, qu'il est utile d'avoir une connaissance du fonctionnement hydraulique et thermique de l'ouvrage. Ces informations permettent d'éviter des placements, réduisant la capacité de caractérisation des fuites, par l'outil thermométrique :

- la fibre optique doit être éloignée des influences thermiques perturbatrices, qui gênent le diagnostic. A Kembs, la proximité du contre-canal diminue la sensibilité de la fibre optique aux fuites. Sur ce même site, la nappe phréatique, affleurante, complexifie l'analyse : elle ajoute une donnée supplémentaire à prendre en compte.
- la fibre optique doit préférentiellement se situer à une profondeur suffisante pour être traversée par les éventuelles fuites. Si la fibre est à faible distance de l'écoulement de fuite, ce dernier peut avoir une influence sur la fibre. Les transferts par conduction sont responsables de cette influence. Cependant, la signature thermique de la fuite sera beaucoup plus faible. Et les variations constatées sur le signal de température pourraient être interprétées comme un effet d'une variation locale du matériau.

Le chemin de parcours des fuites pour atteindre la fibre optique est important, lorsque celle-ci est en position aval. Sur la digue de Kembs, ce chemin est de l'ordre d'une centaine de mètres si l'on considère que les écoulements de fuite sont exclusivement transverses par rapport au canal. Cette distance complexifie la caractérisation des fuites : en traversant la digue, l'écoulement subit les influences thermiques du corps de l'ouvrage. Plus la distance est longue, et plus les vitesses d'écoulement devront être importantes, pour que la fuite occasionne une perturbation thermique au niveau de la fibre optique et puisse être détectée. Concernant la quantification, une condition supplémentaire est à ajouter : l'écoulement doit être porteur de suffisamment d'informations, relatives à la température de l'eau. Un écoulement, dont la température aura été trop perturbée, sera difficilement quantifiable.

Enfin, il faut préciser que la détection d'un écoulement par une fibre, en position aval, ne renseigne pas sur la position du défaut, à l'origine de la fuite. En effet, à l'intérieur de l'ouvrage, les écoulements ne sont pas forcément transverses à l'axe longitudinal de l'ouvrage. Les écoulements frayent leur passage à travers les zones plus perméables.

Finalement, la position amont apparaît plus souhaitable pour la détection et caractérisation de l'écoulement. Les capteurs sont plus proches de l'origine de la fuite. Cependant, un placement amont n'est pas toujours possible. De plus, rappelons que la caractérisation des fuites, en position amont, n'est efficace que si le dispositif de drainage l'est aussi. Or il est envisageable que ce dispositif comporte également des fuites.

Perspectives

Amélioration des modèles

Concernant le modèle impulsionnel MORITO, une discussion peut être menée sur la fonction choisie pour approcher la réponse impulsionnelle. La fonction utilisée, *irfa2*, a été initialement choisie pour la modélisation de problème de diffusion. Or nous nous en servons dans des problèmes d'advection-diffusion. L'amélioration de l'approximation de la réponse impulsionnelle pourrait permettre de diminuer les difficultés d'identification que nous avons rencontrées.

Pour le calcul du produit de convolution, la transformée de Fourier a été utilisée. Cette méthode, efficace en temps de calcul, génère cependant des erreurs sur le début et la fin de période modélisée. En conséquence, nous avons ignoré les données initiales et finales pour l'estimation des paramètres du modèle. Pour contourner ce problème, on pourrait s'intéresser à des fenêtrages particuliers de la transformée de Fourier (fenêtre de Hamming) ou d'autres méthodes numériques de résolution du produit de convolution pourraient être mises en place.

Pour la détection à l'aide de MORITO, la température de l'air a été utilisée en entrée du modèle, on pourrait envisager d'utiliser la température du sol en subsurface, donnée qui intègre les informations liées aux échanges au niveau de l'interface sol/air (rayonnement, précipitations,...).

Nous avons proposé un modèle, MORITO2, exploitant la température de l'air ainsi que celle de l'eau pour reproduire la température mesurée. Ce modèle a montré des résultats satisfaisants sur les données issues des simulations numériques d'une digue en 2D. Sur les données de la plateforme expérimentale PEERINE ou celles de Kembs, le modèle n'a pu être appliqué avec succès. Nous pensons que la séparation, dans le modèle, des influences dues à l'eau de celles dues à l'air n'est pas assez contrainte : le modèle n'est pas assez guidé pour réaliser des estimations cohérentes. Une amélioration de MORITO, en ce sens, permettrait d'analyser les zones sensibles à l'air et à l'eau, situation que l'on peut rencontrer lorsque la fibre, en position aval, est traversée par une fuite dont le débit est tel que, ni la température de l'air ni la température de l'eau, ne peuvent, à elles seules, expliquer la température du point.

Autres modèles de quantification

D'autres méthodes de quantification restent à explorer. Actuellement une méthode reposant sur un modèle d'assimilation de données, basé sur l'utilisation du filtre de Kalman, est en cours de développement dans un travail de thèse. La méthode se base sur un modèle physique des transferts thermiques, dans un ouvrage hydraulique, par diffusion et advection. L'intégration au fil du temps de mesures de température permet de corriger les estimations du modèle. La correction porte sur un paramètre du modèle physique : la conductivité hydraulique. Lorsque la correction est satisfaisante, la conductivité hydraulique trouvée permet de calculer la vitesse. Cette méthode présente l'avantage de fournir en sortie la vitesse d'écoulement. Cependant, elle nécessite des données dont la connaissance ou la mesure n'est pas évidente : paramètres liés au sol, distribution de pression. Précisons que, pour le moment, des obstacles numériques empêchent d'obtenir des estimations stables.

Retour d'expériences des différents sites

L'expérience acquise sur le site de Kembs nous a montré la difficulté de confirmer les résultats des modèles de caractérisation des fuites sur site non-contrôlé. Pour le développement

des modèles, l'utilisation de modèle réduit semi-contrôlé tel que la plateforme PEERINE apparaît nécessaire. Sur ces modèles physiques, la confrontation des estimations avec la réalité est beaucoup plus facile à mettre en œuvre. Évidemment, la validation de ces modèles passe par leur application sur des sites non-contrôlés. Cette validation se forgera, avec le retour d'expérience acquis, sur l'application des modèles sur des ouvrages de configuration et de matériaux différents. Ces tests permettront d'affiner le champ d'application de chaque modèle. Pour le moment, ce retour d'expérience est limité par le nombre d'ouvrages hydrauliques équipés en fibre optique pour la surveillance des fuites. Cependant, ce nouvel outil de surveillance commence à se répandre sur les installations françaises : plusieurs sites industriels sont en cours ou en projet d'installation.

Analyse de fonction de corrélation

Cette annexe est gardée confidentielle par souhait d'EDF, financeur de ce travail de doctorat réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE.

Estimation de vitesses de fuites à travers la digue de Kembs par mesures de traçage

Cette annexe est gardée confidentielle par souhait d'EDF, financeur de ce travail de doctorat réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE.

Bibliographie

- ARMBRUSTER, H., BLINDE, A., BRAUNS, J., DÖSCHER, H. D., HÖTZL, H. et MERKLER, G. P. (1989). The application of geoelectrical and thermal measurements to locate dam leakages. *In* MERKLER, G., MILITZER, H., HÖTZL, H., ARMBRUSTER, H. et BRAUNS, J., éditeurs : *Detection of Subsurface Flow Phenomena*, volume 27, pages 31–47. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- ARMBRUSTER, H. et MERKLER, G. P. (1982). Measurement of subsoil flow phenomena by thermic and geoelectric methods. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 26-27:135–142.
- BECK, Y. (2008). *Evaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques : application géotechnique*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 303 pages.
- BIRMAN, J. H., ESMILLA, A. B. et INDRELAND, J. B. (1971). Thermal monitoring of leakage through dams. *Geological Society of America Bulletin*, 82(8):2261–2284.
- BOLEVE, A. (2009). *Localisation et quantification des zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 223 pages.
- BONELLI, S. (2009). Approximate solution to the diffusion equation and its application to seepage-related problems. *Applied Mathematical Modelling*, 33(1):110 – 126.
- CARSEL, R. F. et PARRISH, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5):755–769.
- CFBR (2011). Comité français des barrages et réservoirs. [http ://www.barrages-cfbr.eu/index2.html](http://www.barrages-cfbr.eu/index2.html).
- CÔTÉ, J. et KONRAD, J. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2):443–458.
- DAIAN, J. (2010). Equilibre et transferts en milieux poreux : Etats d'équilibre.

- DAKIN, J. P., PRATT, D. J., BIBBY, G. W. et ROSS, J. N. (1985). Distributed optical fibre raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electronics Letters*, 21(13):569–570.
- DALY, F. (2004). État des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en france. pages 21–46, Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans.
- DIERSCHE, H. G. et PERROCHET, P. (2002). On the primary variable switching technique for simulating unsaturated-saturated flows. In *FEFLOW White Papers*, volume 1, pages 9–66. Berlin.
- DUHAMEL, P. et VETTERLI, M. (1990). Fast fourier transforms : A tutorial review and a state of the art. *Signal Processing*, 19(4):259–299.
- FARGIER, Y. (2011). *Développement de l'imagerie de résistivité électrique pour la reconnaissance et la surveillance des ouvrages hydrauliques en terre*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 276 pages.
- FAUCHARD, C. et MÉRIAUX, P. (2004). *Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues. Guide pour la mise en oeuvre et l'interprétation*. Paris, 124 pages, cemagref édition.
- FAUCHARD, C., POTHÉRAT, P., CÔTE, P. et MUDET, M. (2004). *Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques : Guide technique*. Techniques et méthodes. LCPC, Paris. 170 pages.
- FOSTER, M. et FELL, R. (1999). Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(5):398–407.
- FOSTER, M., FELL, R. et SPANNAGLE, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5):1000–1024.
- FRY, J. (2004). Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température le long d'une fibre optique. pages 377–391, Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans.
- FRY, J. (2009). Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques. axe 1, essais de laboratoire. Rapport technique, <http://erinoh.lyon.cemagref.fr>, France, 94 pages.
- GÉOPORTAIL (2011). Géoportail - le portail des territoires et des citoyens. <http://www.geoportail.fr/>.
- GUIDOUX, C. (2007). *Développement et validation d'un système de détection et de localisation par fibres optiques de zones de fuite dans les digues en terre*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 207 pages.

- JOHANSSON, S. (1991). Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements. *In Proceedings of the 17th congress of International Commission on Large Dams*, pages 991–1005, Vienne, Autriche.
- JOHANSSON, S. (1997). *Seepage monitoring in embankment dams*. Thèse de doctorat, KTH, Stockholm, 62 pages.
- JOHANSSON, S. (2005). Detection of internal erosion in embankment dams - possible methods in theory and practice. *Stability and Breaching of Embankment Dams*, Oslo. EBL. 24 pages.
- JOHANSSON, S., FARHADIROUSHAN, M. et PARKER, T. (2000). Application of fibre-optic systems in embankment dams for temperature, strain and pressure measurements – some comparisons and experiences. pages 1125–1147, 20ème Congrès de la CIGB, Pékin.
- JOHANSSON, S. et HELLSTRÖM, G. (2001). Software package for evaluation of temperature field in embankment dams. Rapport technique, Hydroresearch and NeoEnergy, Suède, [http ://www.hydroresearch.se/en/temperature/evaluation](http://www.hydroresearch.se/en/temperature/evaluation).
- KAPPELMEYER, O. (1957). The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depths. *Geophysical Prospecting*, 5(3):239–258.
- KHAN, A. A. (2009). *Séparation de sources thermométriques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 230 pages.
- KHAN, A. A., VRABIE, V., MARS, J. I., GIRARD, A. et D’URSO, G. (2008). A source separation technique for processing of thermometric data from Fiber-Optic DTS measurements for water leakage identification in dikes. *Sensors Journal, IEEE*, 8(7):1118–1129.
- KHAN, A. A., VRABIE, V., MARS, J. I., GIRARD, A. et D’URSO, G. (2010). Automatic monitoring system for singularity detection in dikes by DTS data measurement. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 59(8):2167–2175.
- KUNETZ, G. (1966). *Principles of direct current resistivity prospecting*. Gebr. Borntraeger.
- LAGARIAS, J. C., REEDS, J. A., WRIGHT, M. H. et WRIGHT, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1):112–147.
- LANTICQ, V. (2009). *Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 167 pages.
- LE COZ, J., PIERREFEU, G., SAYSET, G., BROCHOT, J. et MARCHAND, P. (2008). *Mesures hydrologiques par profileur Doppler*. QUAE éditions, 155 pages.

- LEPETIT, L. (2002). *Etude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, 287 pages, Clermont Ferrand.
- MALLET, C. et PACQUANT, J. (1951). *Les barrages en terre*. La Houille Blanche édition, 345 pages, Grenoble.
- MÉRIAUX, P., ROYET, P. et FOLTON, C. (2004). *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*. Cemagref éditions, 199 pages, Antony.
- MUSY, A. et SOUTTER, M. (1991). *Physique du sol*. PPUR presses polytechniques.
- PARASNIS, D. (1996). *Principles of Applied Geophysics*. Springer, 5ème édition, 429 pages, Londres.
- PENOT, I., DAUMAS, B. et FABRE, J. (2005). Monitoring behaviour. *Water Power and Dam Construction*, 57:24–27.
- PERZLMAIER, S. (2007). *Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen*. Thèse de doctorat, TU München, München, 200 pages.
- PORRAS VELÁSQUEZ, J. P. (2007). *Fiber optic temperature measurements Further Development of the Gradient Method for Leakage Detection and Localization in Earthen Structures*. Thèse de doctorat, TU München, Munich, 268 pages.
- RADZICKI, K. (2009). *Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites*. Thèse de doctorat, Institut des sciences et industries de vivant et de l'environnement (Agro Paris Tech)), Paris, 175 pages.
- SABATINI, D. A. et AUSTIN, T. A. (1991). Characteristics of rhodamine WT and fluorescein as adsorbing Ground-Water tracers. *Ground Water*, 29(3):341–349.
- SEED, H. et DUNCAN, J. (1987). Failure of teton dam. *Engineering Geology*, 24:173–205.
- SENSORNET (2012). Sentinel DTS - data sheet. <http://www.sensornet.co.uk/technology/distributed-temperature-sensing/sentinel-dts-range/>.
- SERRE, D. (2005). *Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique*. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, 366 pages.
- SHEFFER, M., JOHANSSON, S. et SJÖDAHL, P. (2009). Recent developments in the use of temperature, resistivity and self-potential methods for monitoring embankment dam performance. Congrès annuel 2009 de l'ACB. Canada. 15 pages.

- SOCHALA, P. (2008). *Méthodes numériques pour les écoulements souterrains et couplage avec le ruissellement*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 131 pages.
- SOLAIMAN, B. (2006). *Processus stochastiques pour l'ingénieur*. PPUR presses polytechniques. 241 pages.
- TRATAPEL, G. (2004). Etat du patrimoine des digues du rhône. pages 57–66, Sécurité des digues fluviales et de navigation, Orléans.
- TYLER, S. W., SELKER, J. S., HAUSNER, M. B., HATCH, C. E., TORGERSEN, T., THODAL, C. E. et SCHLADOW, S. G. (2009). Environmental temperature sensing using raman spectra DTS fiber-optic methods. *Water Resources Research*, 45:11.
- VEDRENNE, C., FABRE, J., COURIVAUD, J. et FRY, J. (2009). Détection et quantification des fuites par thermométrie distribuée le long d'une fibre optique, q1. r.42. Vingt troisième congrès des Grands Barrages, Brésil. Commission Internationale des Grands Barrages.
- WIDDER, D. (1975). *The heat equation*. Academic press, Londres, 267 pages.
- ZGA, S. (2010). Modélisation numérique : étude du comportement thermo-hydraulique d'ouvrage en remblais, rapport de stage de fin d'étude de l'école d'ingénieur ENSEEIHT. Rapport technique, Grenoble, 66 pages.